



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Transición de las Comunicaciones Táctico/Operativas de las
FCSE Hacia Capacidades de Banda Ancha: Quimera o Realidad*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO: D. José Isidro Torreblanca

DIRECTORES: D. José González Coma

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Transición de las Comunicaciones Táctico/Operativas de las
FCSE Hacia Capacidades de Banda Ancha: Quimera o Realidad*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa
Especialidad de Sistemas y Tecnologías de Telecomunicación

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

Desde el año 2000, las comunicaciones táctico/operativas de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado (FCSE) han sido principalmente gestionadas a través de un sistema basado en la tecnología propietaria Tetrapol, que solo permite la transmisión de comunicaciones de voz en grupo y el envío de mensajes cortos de datos. La evolución de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías, priorizando los servicios de transmisión de datos frente a las comunicaciones de voz.

Las nuevas demandas tecnológicas de las FCSE para cumplir con sus funciones policiales requieren una evolución del sistema actual. Esto implica la necesidad de integrar servicios de valor añadido, como la transmisión de datos multimedia a través de redes de banda ancha, sobre la infraestructura existente de la red SIRDEE.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es evaluar la siguiente hipótesis: "¿Podrían las nuevas tecnologías de comunicaciones móviles como LTE, 5G y sus características ser adecuadas para evolucionar el sistema actual de comunicaciones tácticas y operativas de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado hacia capacidades de banda ancha, mejorando así el servicio?".

La investigación se centrará exclusivamente en las comunicaciones táctico/operativas de las FCSE que dependen de la red SIRDEE, dejando fuera otras modalidades de comunicación, como las de carácter "administrativo", tales como la telefonía corporativa.

PALABRAS CLAVE

Telecomunicación, PPDR, SIRDEE, transición, banda ancha.

AGRADECIMIENTOS

Como dice un dicho castellano, “es de bien nacido ser agradecido”, por esto quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han acompañado en este camino culminado en la redacción de este Trabajo Fin de Máster.

En primer lugar, a mi tutor, D. José González Coma, por su inestimable apoyo, orientación y paciencia durante todo el proceso de elaboración de este trabajo. Su conocimiento y sabios consejos han sido esenciales para alcanzar este objetivo.

Extiendo mi gratitud a todo el profesorado de este máster del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval de Marín, por su dedicación y el valioso conocimiento transmitido a lo largo de estos dos cursos, que ha sido de gran valía para mi desarrollo profesional y académico.

A mis compañeros de la VII edición del máster universitario en Dirección TIC para la Defensa, quienes hicieron de esta experiencia un aprendizaje compartido. En especial, a Juan Antonio Torres y Jose Alberto, igualmente compañeros de destino, por su camaradería, ideas y el apoyo mutuo que siempre me brindaron.

Quiero también agradecer a mi jefe de unidad, el Subdirector General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad D. Manuel Jesús Izquierdo Bernal, quien me brindó su apoyo flexibilizando algunas de mis responsabilidades para que pudiera cursar el máster sin contratiempos.

Mención especial a mis padres, que ya no están conmigo, pero cuyo ejemplo de esfuerzo y perseverancia sigue guiando cada uno de mis pasos. Este logro está inspirado en los valores que me inculcaron y que me han acompañado siempre.

Por último, y no menos importante, quiero dedicar este trabajo a mi hija Valeria y a su madre Laura, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y fuerza durante este último año y medio. Su amor y comprensión han sido fundamentales para que pudiera completar este trabajo con éxito.

A todos vosotros: ¡Muchas gracias de corazón!

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos del Capítulo	8
1.3 Razones que Fundamentan la Elección del TFM.....	8
1.4 Establecimiento de Hipótesis, Objetivos y Metodología de Trabajo.....	12
1.5 Estructura de la Memoria	13
1.6 Conclusiones del Capítulo	14
2 Estado del arte	15
2.1 Objetivos del Capítulo	15
2.2 Los Sistemas para Seguridad Pública y Emergencias.....	15
2.2.1 Sustento Tecnológico para los Sistemas PPDR.....	17
2.3 El Modelo de Operación como Clave del Éxito de un Sistema PPDR.....	20
2.4 El Sistema PPDR Español de Nuestras FCSE	23
2.4.1 Los Sistemas PPDR de Nuestro Entorno en Términos Económicos.....	24
2.5 Conclusiones del Capítulo	26
3 Desarrollo del TFM.....	27
3.1 Objetivos del Capítulo	27
3.2 Requisitos para las Potenciales Tecnologías de Evolución	27
3.3 Decisión sobre el Modelo de Operación	31
3.3.1 Infraestructura PPDR basada en Redes Dedicadas.....	31
3.3.2 Infraestructura PPDR basada en Redes Comerciales	32
3.3.3 Infraestructura PPDR basada en Redes Híbridas.....	33
3.4 Factores Condicionantes y/o Limitantes	34
3.4.1 El Presupuesto Económico Disponible.....	34
3.4.2 La Ausencia de Normativa Nacional en Materia de QPP.....	35
3.4.3 El Insuficiente Espectro Radioeléctrico para Sistemas PPDR	37
3.4.4 Los Intereses de los Usuarios Finales vs. las Empresas del Sector	44
3.4.5 La Tecnología 5G: Lo que pudo ser y por el momento No es.....	45
3.5 Estrategias de Evolución en Diferentes Redes PPDR del Mundo	47
3.5.1 Estados Unidos: Red FirstNet.....	48

3.5.2 Reino Unido: Red ESN.....	48
3.5.3 Francia: Proyectos PCSTORM y RRF	48
3.5.4 Alemania: Migración de la Red Digitalfunk BOS.....	49
3.5.5 Finlandia: Virve 2.0	49
3.5.6 España: Evolución de la Red SIRDEE	50
3.5.7 BroadEU: El Intento de Convergencia	51
3.6 Conclusiones del Capítulo	51
4 Resultados	53
4.1 Objetivos del Capítulo	53
4.2 Pasos Preliminares	53
4.2.1 La Elección de un Proveedor de Servicios	53
4.2.2 La NO Elección de un Único Proveedor Tecnológico	54
4.2.3 Verificación Tecnológica Preliminar.....	54
4.3 Requisitos Mandatorios para el Despliegue de los Entornos Piloto	54
4.4 Resultado de las Pruebas Preliminares.....	55
4.4.1 Airbus	55
4.4.2 Ericsson.....	56
4.4.3 Huawei.....	57
4.4.4 Motorola	57
4.4.5 Nokia.....	57
4.4.6 Primeras Impresiones.....	58
4.5 Aumentando el Orden de Magnitud: Un Piloto de Dimensión Provincial	59
4.6 La Importancia de la Optimización y el Ajuste Fino	61
4.6.1 Estudio de la Capacidad eMBMS.....	63
4.6.2 Optimización del Piloto de Albacete	65
4.6.3 Otras Configuraciones Pendientes	67
4.7 Las Primeras Impresiones de los Usuarios Finales	67
4.8 Conclusiones del Capítulo	70
5 Conclusiones y líneas futuras	71
5.1 Conclusiones	71
5.2 Líneas Futuras	74
6 Bibliografía.....	75
Anexo I: Acrónimos	80
Anexo II: Aplicación de Metodología Subjetiva: La Encuesta	83
Anexo III: EJEMPLO DE UNA RFI.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ciclo de vida de los proyecto TIC (tomada de [6]).	9
Figura 1-2 Curva de Bañera (tomada de [7]).	9
Figura 2-1 Tecnologías para Private Mobile Radio (tomada de [10]).	17
Figura 2-2 Multiplexación en Frecuencia vs Tiempo (tomada de [11]).	18
Figura 2-3 Redes de Seguridad Pública y Emergencias en Europa (tomada de [13]).	19
Figura 3-1 Despliegue de redes LTE en el mundo (tomada de [19]).	28
Figura 3-2 Despliegue mundial de las redes 5G (tomada de [20]).	28
Figura 3-3 <i>Roadmap</i> de la evolución del estándar LTE (tomada de [22]).	29
Figura 3-4 Evolución de las releases 3GPP (tomada de [23]).	30
Figura 3-5 Izqda.; Inversión necesaria por hogar y tamaño de municipio para el despliegue de una red LTE. Dcha.: estudio de viabilidad económica territorial, (tomadas de [26]).	35
Figura 3-6 Pruebas de PTV con diferentes BWs (elaboradas a partir de [17]).	40
Figura 3-7 Transmisión <i>Broadcast</i> vs. <i>Unicast</i> (elaboradas a partir de [17]).	43
Figura 3-8 Etapas en la transición de las redes PPDR tradicionales hacia E-LTE (tomada de [47]).	47
Figura 4-1 Cobertura teórica de la provincia de Alicante LTE y Tetrapol.	60
Figura 4-2 Cobertura teórica de la provincia de Albacete LTE y Tetrapol.	61
Figura 4-3 Alcance máximo de Tx de único nodo LTE en la provincia de Albacete (tomado de [54]).	61
Figura 4-4 Efecto de la distancia entre <i>sites</i> LTE (tomado de [55]).	62
Figura 4-5 Capacidad de señalización MCS por área MBSFN (tomado de [55]).	63
Figura 4-6 Probabilidad de cobertura multicast en función del alcance de los eNB dominantes [54].	65
Figura 4-7 Capacidad del DL con todos los eNB en <i>multicast</i> y con los 19 eNB dominantes en <i>unicast</i> [54].	66
Figura A2-1 Vista general de la encuesta.	83
Figura A2-2 Estadísticas cuestión 1.	83
Figura A2-3 Estadísticas cuestión 2.	83
Figura A2-4 Estadísticas cuestión 3.	84
Figura A2-5 Estadísticas cuestión 4.	84
Figura A2-6 Estadísticas cuestión 5.	84
Figura A2-7 Estadísticas cuestión 6.	84
Figura A2-8 Estadísticas cuestión 7.	85
Figura A2-9 Estadísticas cuestión 8.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Categoría Sistemas <i>Private Mobile Radio</i> (elaborada a partir de [9])	17
Tabla 2-2 Comparativa TETRAPOL vs. TETRA (elaborada a partir de [16])	20
Tabla 2-3 Bitácora del servicio SIRDEE con sus principales hitos	22
Tabla 2-4 Densidad Económica del Sistema PPDR Nacional (tomada de [18])	24
Tabla 2-5 Coste de Algunos Sistemas PPDR de Nuestro Entorno (tomada de [18])	25
Tabla 2-6 Coste de Algunos Sistemas PPDR de Nuestro País (tomada de [18])	25
Tabla 3-1 Funcionalidades PPDR que han de ser implementadas en tecnologías 3GPP, (tomada de [21])	29
Tabla 3-2 Funcionalidades de misión crítica vs. <i>releases</i> 3GPP (elaborada a partir de [22], [23]).	31
Tabla 3-3 MORAN vs. MOCN vs. GWCN (elaborada a partir de [25]).	34
Tabla 3-4 Pruebas de PPT con diferentes anchos de banda (elaborada a partir de [17]).	40
Tabla 3-5 Capacidad teórica del número de terminales en conversación simultánea en una red LTE (elaborada a partir de [17])	41
Tabla 3-6 Inscripción de terminales en la red SIRDEE (Barcelona) durante el dispositivo policial extraordinario de la DUI en la CA. Cataluña (elaborada a partir de [17])	42
Tabla 3-7 Inscripción de terminales en la red SIRDEE durante un día de operación en Madrid centro (elaborada a partir de [17])	42
Tabla 3-8 Pruebas de MCPTV con diferentes BWs e implementando eMBMS (elaboradas a partir de [37])	43
Tabla 4-1 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Airbus.	55
Tabla 4-2 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Ericsson.	56
Tabla 4-3 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Huawei	57
Tabla 4-4 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Motorola.	57
Tabla 4-5 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Nokia.	57
Tabla 4-6 Tabla resumen de los requisitos de las diferentes empresas presentadas.	58
Tabla 4-7 Número máximo de llamadas de grupo PPT en DL en función del GBR (tomada de [55])	64
Tabla 4-8 Número máximo de llamadas de grupo PPV en DL para un GBR de 500 kbps (tomada de [55])	64
Tabla 5-1 Resumen del grado de consecución de los objetivos perseguidos.	73

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Cuando en mayo de 2024 la Secretaría de Estudios del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval de Marín me confirmó la temática de este Trabajo Fin de Máster (TFM), comencé a reflexionar sobre la mejor forma de abordarlo. Consideré la posibilidad de realizar un trabajo muy técnico, aunque corría el riesgo de que resultara tedioso. Finalmente, opté por una aproximación seria, priorizando la precisión, concreción y profesionalidad, con el objetivo de transmitir claramente lo que se pretende. Esta decisión me permitió poner el broche final a este Máster en Dirección de Proyectos TIC para la Defensa.

A lo largo de este TFM, se intentará sintetizar el trabajo que la Secretaría de Estado de Seguridad del Ministerio del Interior, en colaboración con la Policía Nacional y la Guardia Civil, está llevando a cabo en el ámbito de las comunicaciones táctico-operativas. En particular, se abordará el esfuerzo en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) enfocado en la evolución del sistema actual de banda estrecha, hacia nuevos servicios vinculados a la banda ancha. El trabajo incluirá experiencias profesionales, preocupaciones, vacíos, las casi infinitas posibilidades y el largo camino aún por recorrer, siempre con un enfoque en la objetividad y la realidad con que se está enfrentando esta nueva etapa; “Es justamente la posibilidad de realizar un sueño lo que hace que la vida sea interesante” [1].

Cuando se busca un patrón para explicar el auge de las comunicaciones móviles convencionales, es inevitable pensar en la evolución que han experimentado estos dispositivos. El crecimiento tecnológico de estas plataformas, combinado con el aumento de sus capacidades y la disminución de precios, ha hecho que sean accesibles para todo tipo de usuarios. Es impresionante recordar la transformación que han sufrido los teléfonos móviles: lo que en teoría era un dispositivo para hablar, se ha convertido en una herramienta multifuncional, capaz de hacer prácticamente de todo, excepto hablar, algo que hubiera sido inimaginable hace quince años [2].

En 1965, Gordon Moore formuló su famosa ley, afirmando que la cantidad de transistores por unidad de superficie se duplicaba anualmente. Más tarde, en 1975, revisó su teoría, ajustando este periodo de duplicación a dos años, reflejando un crecimiento exponencial. En la práctica, esto implica que los ordenadores duplican su capacidad cada dos años, lo que provoca una reducción de precios y, al mismo tiempo, una obsolescencia acelerada al mismo ritmo.

Parece que esta ley también se refleja en el avance tecnológico de los sistemas de comunicaciones móviles de uso general.

En este contexto, el ámbito de la Seguridad Pública no puede quedarse al margen de este progreso. Así lo establece el Consejo de la Unión Europea en su Estrategia de Seguridad Interior renovada 2015-2020, donde se señalaba como una de las directrices estratégicas en el espacio de libertad, seguridad y justicia: "Desarrollar y fomentar el uso seguro de las tecnologías de la información y las comunicaciones para fortalecer la seguridad dentro de la Unión Europea." [3].

Al buscar el reflejo de estas directrices en la legislación nacional, es relevante destacar la - Estrategia Nacional contra el Crimen Organizado y la Delincuencia Grave (2019-2023): La seguridad es un proyecto común-. En su eje transversal 9, se establece como objetivo el "uso de la tecnología en la lucha contra el crimen del siglo XXI" [4].

Al diseñar un sistema destinado a soportar las comunicaciones táctico/operativas de las fuerzas policiales, es esencial considerar una serie de características críticas. La estabilidad, capacidad, disponibilidad y seguridad del sistema deben estar sobredimensionadas para garantizar su operatividad sin interrupciones, especialmente cuando se enfrenta al estrés inherente de las misiones críticas¹. En estas situaciones, las organizaciones de respuesta no pueden permitirse fallos en las comunicaciones, ya sea a nivel individual o grupal, dado que cualquier interrupción podría comprometer la eficacia de la misión y la seguridad de los operativos [5].

La cuestión fundamental que plantea este TFM es si las sinergias derivadas de las tecnologías de alta capacidad empleadas en las comunicaciones móviles de uso general pueden ser efectivamente aprovechadas y adaptadas para sistemas de comunicación destinados a emergencias y seguridad pública.

Esta introducción no puede acabar sin contextualizar brevemente el momento el que se realiza esta investigación. A nivel mundial, se está atravesando una crisis multifacética que ha tenido un profundo impacto en todos los aspectos de la vida cotidiana. La pandemia de COVID-19 ha puesto en jaque los sistemas sanitarios, económicos y sociales en una escala sin precedentes. A medida que el mundo enfrenta una recuperación económica desigual y enfrenta nuevas variantes del virus, el impacto en los suministros y en la estabilidad económica sigue siendo significativo y que de una manera o de otra condicionará la elaboración de este TFM.

1.2 Objetivos del Capítulo

En este capítulo se detallan las razones y preocupaciones profesionales que motivaron la elección del tema de este TFM.

Asimismo, y como resultado de lo anterior, se formula la hipótesis principal y se delinear las líneas de trabajo que se seguirán a lo largo de este TFM para su verificación en la parte final de la investigación.

1.3 Razones que Fundamentan la Elección del TFM

El sistema que respalda las comunicaciones tácticas operativas policiales² en España, al igual que cualquier otro sistema de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC), está sujeto a un ciclo de vida. Este ciclo se puede definir como el conjunto de etapas necesarias para crear, operar y mantener dicho sistema. En términos generales, dicho ciclo de vida incluye las siguientes fases [6]:

- **Introducción:** El ciclo de vida comienza con la identificación de una necesidad por parte del usuario, que debe ser satisfecha mediante la implementación de un sistema TIC específico. En esta fase, es necesario llevar a cabo un estudio de viabilidad previo, tanto técnico como económico.

¹ Aquellas en las que se arriesga la vida humana, se llevan a cabo operaciones de rescate o se garantiza el cumplimiento de la ley.

² Las agencias policiales referidas son las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado (FCSE).

- **Crecimiento:** Después de realizar los estudios de viabilidad pertinentes, se procede al análisis de los requerimientos y especificaciones, tanto técnicas como operativas. A partir de este análisis, se elabora un diseño que servirá como base para el desarrollo del sistema. Esta fase implica esencialmente diseñar, construir y adaptar los sistemas y procedimientos necesarios para abordar el problema o necesidad planteada por el usuario final.
- **Madurez:** El sistema está terminado y el usuario está utilizando las funcionalidades que se han previsto para cubrir sus objetivos. Si no satisface plenamente los requerimientos funcionales o de usuario o si se detecta un error, es necesario utilizar un sistema de mantenimiento adecuado, tanto correctivo como preventivo.
- **Declive:** Cuando deja de ser necesario para cubrir la necesidad planteada o cuando debe ser reemplazado por otro que se adapte mejor a sus necesidades, comenzando así un nuevo ciclo.

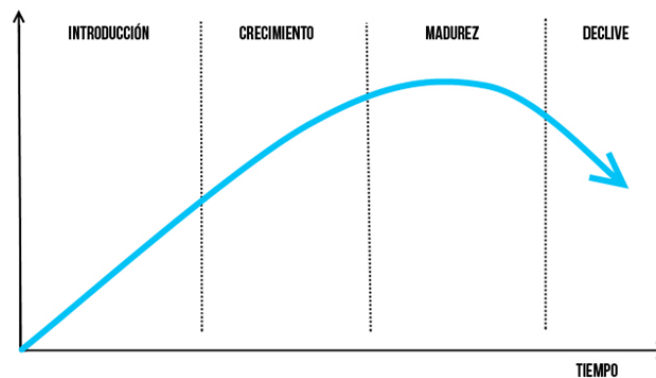


Figura 1-1 Ciclo de vida de los proyecto TIC (tomada de [6]).

Estrechamente vinculado con este concepto, podemos considerar la tasa de error o fallo de funcionamiento que, de manera inevitable, ocurre durante la vida útil de un sistema TIC. Se ha demostrado empíricamente que esta tasa se puede representar mediante la llamada "curva de la bañera" [7].

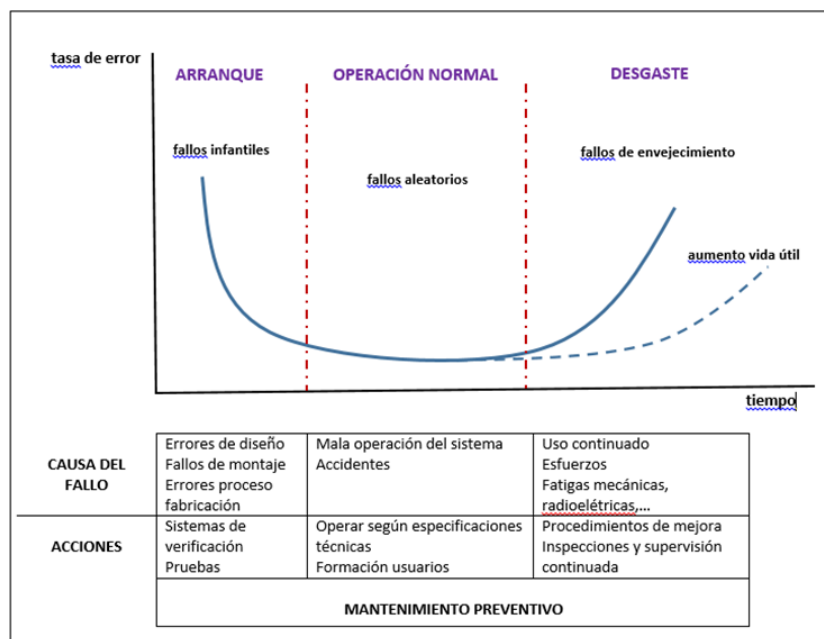


Figura 1-2 Curva de Bañera (tomada de [7])

El gráfico anterior ilustra esta curva, destacando las causas de los fallos o errores que ocurren a lo largo del tiempo y las acciones que se pueden tomar para mitigar, en la medida de lo posible, sus efectos.

Aunque se desarrollará con el debido detenimiento en el próximo capítulo, es importante adelantar que las transmisiones SIRDDE se basan en un modelo de servicio con un robusto sistema de mantenimiento integral que abarca todos los componentes del sistema (incluido el parque de terminales y accesorios). Esto ha permitido extender su vida útil en condiciones más que aceptables durante sus 24 años de funcionamiento.

No queda ninguna duda que el sistema que soporta las comunicaciones táctico-operativas es una red *legacy*; esto es una infraestructura tecnológica que ha sido desplegada y operada durante un período prolongado y que, a pesar de ser funcionales, se encuentran basadas en tecnologías antiguas que han sido superadas por soluciones más modernas. Estos sistemas suelen ser fundamentales para las operaciones de una organización, y su sustitución o actualización presenta desafíos significativos tanto técnicos como operativos. Las principales características de esta calificación son:

- **Antigüedad tecnológica:** Los sistemas *legacy* se basan en tecnologías que fueron punteras en el momento de su implementación, pero que hoy en día pueden estar obsoletas. En el ámbito de las redes de comunicaciones PPDR (*Public Protection and Disaster Relief*), esto podría implicar el uso de estándares de comunicación más antiguos, como TETRA o TETRAPOL, que si bien han sido eficaces, están siendo superados por tecnologías como LTE o 5G en términos de capacidad de transmisión de datos y flexibilidad³.
- **Robustez y fiabilidad:** Uno de los principales motivos por los que los sistemas *legacy* continúan en operación es su probada fiabilidad. A menudo, estos sistemas han demostrado ser extremadamente robustos y estables en situaciones críticas, lo que les otorga la confianza de los usuarios. En redes PPDR, esta fiabilidad es esencial, dado que fallos en la comunicación pueden tener consecuencias graves en situaciones de emergencia.
- **Limitaciones tecnológicas:** A pesar de su fiabilidad, los sistemas *legacy* presentan limitaciones significativas, especialmente en lo que respecta a la integración con nuevas tecnologías. La capacidad de transmisión de datos de los sistemas *legacy* puede ser limitada, lo que dificulta la adopción de nuevas aplicaciones que requieren un mayor ancho de banda.
- **Otro de los mayores desafíos con los sistemas *legacy* es la interoperabilidad con tecnologías más modernas.**
- **Mantenimiento y soporte:** A medida que los sistemas *legacy* envejecen, el mantenimiento se vuelve más complejo y costoso. Las piezas de repuesto pueden volverse difíciles de conseguir, y el conocimiento técnico especializado necesario para mantener estos sistemas puede ser escaso a medida que los expertos en la tecnología se retiran.
- **Riesgos de seguridad:** Con el paso del tiempo, los sistemas *legacy* pueden volverse vulnerables a nuevas amenazas de seguridad que no existían cuando fueron diseñados. En el contexto de redes PPDR, donde la seguridad es crucial, esto representa un riesgo significativo. La capacidad limitada de los sistemas *legacy* para implementar nuevos protocolos de seguridad puede hacerlos susceptibles a ciberataques.
- **Costes asociados:** Aunque los sistemas *legacy* pueden parecer económicos a corto plazo porque la infraestructura ya está desplegada y pagada, los costes a largo plazo pueden ser elevados debido al mantenimiento, la falta de escalabilidad y los problemas de interoperabilidad. En redes PPDR, la necesidad de garantizar una alta disponibilidad y seguridad puede llevar a inversiones continuas en la actualización y mantenimiento de estos sistemas.

³ La capacidad de transmisión y la flexibilidad NO son condiciones suficientes para considerar a LTE y 5G tecnologías aptas para comunicaciones críticas de emergencias.

Es indiscutible que, después de todo este tiempo, el sistema actual se encuentra en la fase de declive, debido principalmente a:

- Problemas de obsolescencia tecnológica y fatiga de materiales.
- Aumento del nivel de incertidumbre en relación con la viabilidad del negocio y otras cuestiones empresariales que han surgido repentinamente en el proveedor tecnológico (AIRBUS *Defence & Space*), lo cual es especialmente relevante en un servicio estratégico como SIRDEE.

Dada la importancia de este último punto, se considera necesario abordarlo con mayor profundidad. La red SIRDEE, que soporta el servicio de radiocomunicaciones táctico/operativas de las FCSE, tiene un carácter estratégico indiscutible. Es fundamental asegurar en todo momento la continuidad de las comunicaciones policiales, de manera que el servicio no pueda ser interrumpido bajo ninguna circunstancia, independientemente de la empresa proveedora del servicio o de la tecnología utilizada en la solución ofrecida.

En relación con este asunto, en septiembre de 2015, la Secretaría de Estado de Seguridad (SES) tuvo noticia de que el Grupo AIRBUS tenía la intención de desprenderse de su división de Comunicaciones Profesionales (conocida como *Secure Land Communications*, en adelante SLC), en la cual se encuentra Cassidian, el proveedor tecnológico actual de SIRDEE. Esta noticia generó múltiples interrogantes e incertidumbres sobre el plan futuro, la inversión y el desarrollo que un potencial comprador pudiera tener para una tecnología propietaria como TETRAPOL, cuyos principales clientes son Francia y España (y, en menor medida, Brasil, México, Suiza y República Checa).

Las gestiones iniciales realizadas con la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI) y los responsables del Grupo AIRBUS no lograron disipar las incertidumbres causadas por la decisión de venta. Tanto Telefónica Móviles España (TME), proveedor del servicio para el Ministerio Interior, como el proveedor tecnológico informaron que habían firmado un acuerdo mediante el cual éste último garantizaba el soporte necesario (tanto en mantenimiento como en evolución) de la red SIRDEE hasta 2035. Sin embargo, la preocupación que quedaba sin resolver era si el futuro comprador asumiría este acuerdo a medio y largo plazo en los términos planteados, especialmente en lo que respecta a invertir lo suficiente en I+D para asegurar que la red evolucione de manera comparable a soluciones basadas en estándares como TETRA.

Posteriormente, funcionarios de la Oficina del Programa SIRDEE pertenecientes a la Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad (SGSICS)⁴ viajaron a la sede del Servicio de Tecnologías y Sistemas de Información de la Seguridad Interior del Ministerio del Interior francés, con el propósito de evaluar la posición y las estrategias que el otro gran usuario de TETRAPOL planeaba adoptar frente a esta situación inesperada.

Los responsables técnicos de los Ministerios de Interior de Francia y España coincidieron en que el anuncio de la venta de la división de comunicaciones de Airbus generaba una gran preocupación respecto al mantenimiento y evolución futura de la red.

La delegación francesa señaló que la viabilidad económica de la red, y por lo tanto de la tecnología, dependía del compromiso mutuo de ambos países de continuar apoyando a TETRAPOL. Si Francia o España decidieran dejar de utilizar esta tecnología, el otro país no podría seguir proporcionando el servicio de comunicaciones policiales bajo esta solución tecnológica.

La situación actual, en Q3 de 2024, es que AIRBUS SLC sigue estando en venta, con un acuerdo tácito para mantener la tecnología hasta 2035. Esto mantiene la incertidumbre sobre la viabilidad y

⁴ Le corresponde a esta Unidad coordinar, desarrollar e implantar el Sistema Integral del Radiocomunicaciones Digitales de Emergencia del Estado conforme al art. 2.5-b).8º del RD 207/2024 de 7 de febrero por el que se desarrolla la estructura orgánica del Ministerio de Interior.

continuidad del sistema que respalda las comunicaciones policiales tácticas y operativas de las FCSE en niveles altos.

1.4 Establecimiento de Hipótesis, Objetivos y Metodología de Trabajo

Los motivos mencionados en el apartado anterior son razones de peso que han llevado a los responsables de SIRDEE, dentro del ámbito de la SES, a considerar de manera activa el reto de la búsqueda de alternativas a la tecnología actual que sustenta las comunicaciones táctico/operativas de las FCSE.

La hipótesis principal que se propone en este TFM es: *"¿Podrían las nuevas tecnologías de comunicaciones móviles como LTE, 5G y sus características ser adecuadas para evolucionar el sistema actual de comunicaciones tácticas y operativas de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado hacia capacidades de banda ancha, mejorando así el servicio?"*.

A partir de la hipótesis planteada, el objetivo principal es el proceso de evaluación y verificación de la misma, para lo cual se han delineado los objetivos secundarios y líneas de acción, que se describen a continuación:

- Establecer la justificación del estudio.
- Contextualizar el sistema actual de comunicaciones tácticas y operativas de las FCSE. Este enfoque busca responder a la pregunta sobre las ventajas y limitaciones del sistema actual, y qué aspectos deben considerarse al evolucionar una red de comunicaciones a nivel nacional.
- Descripción de las principales características de la tecnologías LTE y 5G evaluando qué requisitos deben cumplir necesariamente para ser consideradas adecuadas para una red de emergencias de cobertura nacional, enfatizando en la característica de requisitos necesarios pero no suficientes.
- Identificar los retos existentes, tanto técnicos como de otra índole, en un proyecto de migración de una red de ámbito nacional.
- Realización de pruebas de campo y simulaciones.
- Confeccionar un documento de referencia que sea al alumno que suscribe de utilidad en la confección del próximo pliego de prescripciones técnicas del servicio SIRDEE en Q2 y Q3 de 2025.

El universo de estudio de este Trabajo Fin de Máster queda acotado a las comunicaciones táctico/operativas de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, no entrando en:

- Sistemas de Comunicaciones de otros Cuerpos no estatales conforme a lo establecido en la ley 2/86, de 13 de marzo de Fuerzas y Cuerpos de Seguridad.
- Comunicaciones de carácter "administrativo", como la telefonía corporativa, cuya evolución está enmarcada en el Contrato Unificado de Comunicaciones para la Guardia Civil y la Policía Nacional, promovido por la SES.

No obstante, se hace necesario abordar potenciales diferencias entre Guardia Civil y Policía Nacional al tener diferentes demarcaciones territoriales de operación.

La metodología de investigación empleada tiene dos enfoques: uno subjetivo y otro objetivo. El enfoque subjetivo consistió en llevar a cabo una encuesta⁵, a profesionales de Guardia Civil con la especialización en Grupos de Apoyo a las Tecnologías de la Información (GATI). El objetivo es

⁵ Ver Anexo II, esta encuesta ha sido revisada por D. Salvador Villegas Pino, licenciado en Psicología por la Universidad Nacional de Educación a Distancia y comandante de la Guardia Civil. El cuestionario resulta idóneo ya que únicamente se persigue obtener datos nominales que sirvan para fundamentar hipótesis y complementar resultados.

obtener, directamente de profesionales y expertos en el ámbito de la seguridad, sus percepciones sobre ciertos aspectos de estos sistemas, así como posibles prejuicios relacionados con su uso.

El método objetivo se basa en una investigación exhaustiva de carácter documental y descriptivo, sustentada por numerosos estudios de grupos de trabajo especializado y personal experto que han pasado por revisiones de la comunidad científica. También se realizará trabajo en campo con la realización de medidas de optimización en los pilotos que actualmente la SGSICS se encuentra desplegando en las provincias de Alicante, Albacete, Madrid, Toledo, Guadalajara, Segovia y Valladolid.

Las fuentes empleadas para este trabajo incluyen principalmente manuales, recursos en línea y la experiencia profesional propia.

De igual manera se ha contado con unos entornos de prueba en las provincias de Albacete y Alicante que han permitido dar a este trabajo una impronta práctica, no siendo por tanto una investigación puramente teórica.

1.5 Estructura de la Memoria

Esta memoria se encuentra organizada en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1, Introducción y Objetivos: Primera exposición en una manera clara, concisa y breve para tratar atrapar el interés del lector, proporcionando la información justa y necesaria para entender la importancia y el propósito del TFM. se pretenden describir las motivaciones e inquietudes de índole profesional que han llevado a decidir la temática de este Trabajo Fin de Máster. De igual manera, una vez realizada la formulación de la hipótesis principal, se detallaran el universo de estudio y las líneas de trabajo que se siguen a lo largo de este TFM para poder proceder a la verificación de la misma en la parte final de esta investigación.
- Capítulo 2, Estado del Arte: La finalidad de este capítulo 2 es realizar una contextualización actual de los sistemas que dan soporte a las comunicaciones policiales operativas particularizando para las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado en España. Conocer someramente el sistema del cual se parte servirá de base para dar justificación a las motivaciones y la hipótesis principal planteada en el capítulo anterior.
- Capítulo 3, Desarrollo del TFM: Durante el capítulo 3 se persigue determinar cuáles son los elementos clave que se han de tener en cuenta así como las decisiones (algunas de carácter estratégico) que han de ser tomadas a la hora de plantear la evolución del sistema actual. Estos elementos son de transcendental importancia dado que de su análisis se podrá evaluar la viabilidad de la citada evolución y por tanto la verificación de la hipótesis principal planteada al comienzo de este TFM.
- Capítulo 4, Resultados y Verificación: A partir de las conclusiones del capítulo anterior, en el capítulo 4 se propondrá una solución piloto para poder analizar si la transición hacia capacidades de banda ancha en el momento de redacción de este TFM es una quimera o puede convertirse en realidad llegando a la verificación del cumplimiento total, parcial de las hipótesis planteadas.
- Capítulo 5 Conclusiones y Líneas Futuras: Incluye las conclusiones generales derivadas de la simulación del ataque, así como las posibles líneas de trabajo futuro que podrían desarrollarse a partir de este TFM, aprovechando los conocimientos adquiridos durante su elaboración.
- Capítulo 6 Bibliografía: Detalla las fuentes de consulta, tanto bibliográficas como digitales, que han sido utilizadas para la elaboración de este Trabajo Fin de Máster.
- Anexos: Aportan información adicional y de apoyo al contenido propio del desarrollo del trabajo.

1.6 Conclusiones del Capítulo

A lo largo de este capítulo se han dado motivaciones y argumentos que justifican la razón de ser de este Trabajo Fin de Máster, guardando todos ellos relación con la categorización de red *legacy* al sistema que sustenta las comunicaciones táctico/operativas de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, el cual continúa jugando un papel crucial en la seguridad y coordinación de los servicios de emergencia de nuestro país. Sin embargo, la evolución tecnológica y las nuevas demandas operativas están impulsando la necesidad de modernizar estas redes, lo que presenta tanto oportunidades como desafíos significativos.

Con base en estas fuentes, se ha formulado la hipótesis principal (HP), detallando las dos líneas de investigación definidas y la metodología establecida para verificarla al final de este TFM.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Objetivos del Capítulo

El objetivo de este capítulo es ofrecer una caracterización actual de los sistemas que respaldan las comunicaciones táctico/operativas policiales en nuestro país, los cuales no difieren mucho de los usados por la mayoría de los cuerpos policiales existentes en el mundo.

La solución para este tipo de comunicaciones de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado (FCSE) se fundamenta en el Servicio Integral de Radiocomunicaciones de Emergencia del Estado (SIRDEE). Debido a la magnitud y complejidad del SIRDEE, no se busca proporcionar una descripción exhaustiva de todos los aspectos técnicos, pero es importante destacar dos características principales:

- Son comunicaciones PPDR, es decir, para situaciones de seguridad pública y emergencias, lo cual les proporciona de una serie de particularidades que serán detalladas más adelante.
- El *Business Model* de este sistema está basado en un servicio.

Tener un conocimiento general del sistema de origen servirá como base para justificar la hipótesis principal y las motivaciones planteadas en el capítulo anterior.

2.2 Los Sistemas para Seguridad Pública y Emergencias

El colapso y la destrucción de las Torres Gemelas del *World Trade Center* en Nueva York, resultante del ataque terrorista del 11 de septiembre de 2001, que cobró la vida de aproximadamente 2.800 personas, incluidos 350 miembros de los servicios de seguridad y emergencias, subrayó la imperiosa necesidad de que estos servicios dispongan de una red de comunicaciones robusta. Tal red debe garantizar la conectividad continua tanto entre los operativos en el campo como con sus centros de mando y control, permitiendo así una respuesta coordinada, ágil, efectiva y, fundamentalmente, segura [8].

Como respuesta a esta tragedia, el Gobierno de los Estados Unidos encargó, al Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), la elaboración de un informe exhaustivo. Este documento tenía como objetivo realizar un análisis pormenorizado de los acontecimientos, identificando las causas, los métodos empleados por los terroristas, las repercusiones, así como las medidas y procedimientos adoptados para mitigar la situación y restablecer la normalidad. El propósito era sacar conclusiones que pudieran mejorar la prevención y optimizar las respuestas frente a eventos similares en el futuro.

Dentro de los informes generados por el NIST, se incluyeron análisis detallados sobre el desempeño de los sistemas de radiocomunicaciones empleados por los servicios de emergencia durante la catástrofe [8].

Las conclusiones de estos informes, revelaron que todos los servicios operativos se enfrentaron a diversos problemas con sus sistemas de radiocomunicaciones, principalmente debido a dos factores: la insuficiencia de cobertura en interiores (conocida como cobertura *indoor*) y el aumento exponencial en el tráfico de comunicaciones de radio.

Adicionalmente, se identificaron otros problemas que comprometieron la calidad de las radiocomunicaciones, tales como los elevados niveles de ruido de fondo, el desgaste y el mal mantenimiento de los equipos, así como las interferencias causadas por transmisiones simultáneas desde múltiples dispositivos.

Los estudios también pusieron de manifiesto la falta de interoperabilidad entre los sistemas utilizados, destacando que durante las operaciones en el terreno, los miembros de un departamento no podían comunicarse eficazmente con los integrantes de otros servicios. Esta incapacidad para intercambiar información entre diferentes organismos comprometió la agilidad necesaria para coordinar una respuesta efectiva [8].

Este tipo de redes, conocidas en este contexto como PPDR, o redes para seguridad pública y situaciones de emergencia, se distinguen por las siguientes características esenciales [9]:

- Alta Disponibilidad, Robustez y Resiliencia: La red debe garantizar una disponibilidad extremadamente alta, lograda mediante una arquitectura con elementos redundantes y modos de operación degradados que mantengan funcionalidades básicas incluso en caso de fallos severos en los sistemas.
- Estabilidad y garantía de las comunicaciones: Es crucial que la red esté sobredimensionada para soportar comunicaciones estables, incluso bajo condiciones de tráfico elevado. El tiempo de establecimiento de una comunicación no debe superar los 500 ms.
- Seguridad ante intrusiones: Las comunicaciones deben ser protegidas contra accesos no autorizados mediante el uso de sistemas de cifrado avanzados, mecanismos de autenticación robustos, y la capacidad de deshabilitar terminales comprometidos.
- Soporte para comunicaciones en grupo: Dado que los servicios de seguridad y emergencias operan principalmente en grupos, la red debe ofrecer funcionalidades de comunicación grupal eficientes.
- Dispositivos y terminales robustos: Los terminales utilizados en estas redes deben ser más resistentes que los empleados en redes comerciales públicas, para soportar las exigencias del entorno operativo.

Por lo tanto, las redes PPDR pueden considerarse un caso específico dentro del ámbito de los sistemas PMR⁶, con características distintivas que las separan de las redes públicas de comunicaciones de uso general.

Las redes PMR se clasifican generalmente en tres grandes categorías: Comerciales, Profesionales, y de Seguridad Pública y Emergencia. Esta clasificación distingue las redes según las necesidades de comunicación, los usuarios a quienes van dirigidas, y los estándares aplicables, como se ilustra en la tabla 2-1 [9]:

⁶ PMR acrónimo inglés de *Private Mobile Radio* para referirse a los sistemas de radio móvil para grupos cerrados de usuarios.

	Comercial e Industrial		Bussiness Critical y Profesional		Seguridad Pública y Misión Crítica
Usuarios Típicos	Agricultura, Venta al por menor, Hostelería, Educación, Gestión de propiedades	Agencias de alquiler, Construcción, Seguridad privada, Almacenamiento, Servicios públicos, Transporte	Sector primario, Transportes, Petroquímicas, Minería Trasportes	Aeropuertos, Puertos, Gobierno local	Servicios de transporte público, Servicios de emergencia
Necesidades de Comunicación	Comunicaciones bidireccionales, de bajo coste y con cobertura limitada. Aplicaciones básicas		Comunicaciones privadas, eficientes y rentables económicamente. Alta fiabilidad. Amplia área de cobertura. Aplicaciones avanzadas.		Comunicaciones seguras para misiones críticas. Máxima tolerancia a fallos. Amplia área de cobertura. Funcionalidades avanzadas.
Estándares de Radio	Espectro sin licencia (hasta 0.5W de potencia) ETSI: DMR Nivel 1: Sin licencia, dPMR Nivel 1: Sin licencia.		Espectro con licencia (5W de potencia) ETSI: DMR Nivel 2: Convencional, DMR Nivel 3: Trunking.		Espectro con licencia (5W de potencia) ETSI: TETRA con licencia Trunking, TIA: Project 25 con licencia, Tetrapol con licencia.

Tabla 2-1 Categoría Sistemas *Private Mobile Radio* (elaborada a partir de [9])

2.2.1 Sustento Tecnológico para los Sistemas PPDR

Las categorías de la tabla anterior, incluían tanto soluciones estandarizadas como sistemas propietarios, y su éxito en términos de despliegue y adopción territorial fue variado. Algunas lograron una implementación significativa en redes PMR, mientras que otras quedaron limitadas a aplicaciones específicas.

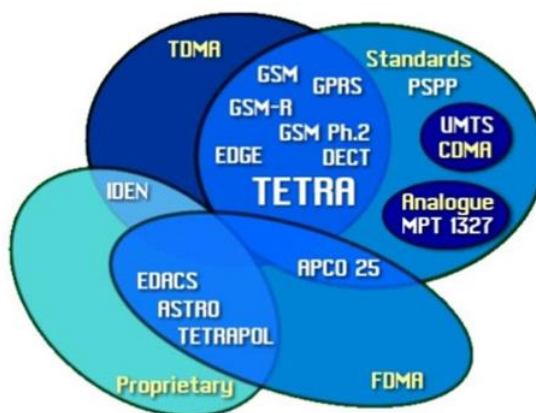


Figura 2-1 Tecnologías para Private Mobile Radio (tomada de [10])

La figura 2-1 ofrece una visión de la variedad tecnológica que caracterizaba ese periodo en el contexto de las redes PMR, especialmente en su aplicación a comunicaciones críticas de seguridad y emergencias.

Existen por tanto dos grandes categorías de sistemas basados en el tipo de acceso radio utilizado [10]:

- Acceso múltiple por división en el tiempo, (*Time Division Multiple Access*) TDMA: En este método, el canal de radio se segmenta en distintas ranuras de tiempo llamadas "slots". A cada usuario que realiza una llamada se le asigna un slot específico para la transmisión, permitiendo que varios usuarios compartan el mismo canal alternativamente sin interferencias. Ejemplos de tecnologías que emplean TDMA incluyen TETRA, DECT y MPT 1327, tal como se muestra en la figura.
- Acceso múltiple por división en frecuencia, (*Frequency Division Multiple Access*) FDMA: En este caso, el espectro disponible se divide en múltiples canales de frecuencia, asignando cada canal a diferentes usuarios y comunicaciones sin que se interfieran entre sí. TETRAPOL, EDACS y P25 son ejemplos de tecnologías que utilizan FDMA.

Los sistemas TDMA requieren mecanismos precisos de sincronización, pero la circuitería en transmisores y receptores es más sencilla en comparación con los sistemas FDMA. Teóricamente, TDMA es más eficiente en el uso del espectro que FDMA, aunque esta eficiencia puede variar según el volumen de tráfico en la red. Además, los sistemas FDMA son más susceptibles a la diafonía⁷ debido a imperfecciones en los filtros paso banda.

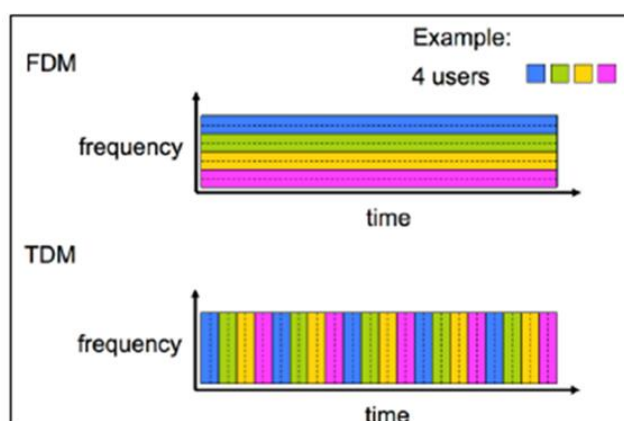


Figura 2-2 Multiplexación en Frecuencia vs Tiempo (tomada de [11])

Incidiendo nuevamente en la ilustración 2-1, se puede apreciar que existen tecnologías basadas en desarrollos industriales de tipo propietario, como TETRAPOL de Airbus D&S o ASTRO de Motorola, así como tecnologías definidas por organismos internacionales de estandarización, como TETRA desarrollado por ETSI⁸, P25 elaborado por TIA⁹, y el ampliamente conocido GSM, también definido por ETSI.

Este aspecto, como se abordará más adelante, desempeña un papel crucial en la evolución, desarrollo, costos, éxito comercial y despliegue de las diferentes soluciones tecnológicas.

Inicialmente, las redes de tipo propietario tuvieron un desarrollo más acelerado. Así, las primeras redes PPDR a nivel nacional en Europa, como la red RUBIS/ACROPOL en Francia y SIRDEE en España, que se basan en TETRAPOL, se implementaron utilizando estas soluciones propietarias. Sin

⁷ Diafonía o *crosstalk*, se refiere a la interferencia no deseada que ocurre cuando una señal en un canal de comunicación induce una señal en otro canal adyacente.

⁸ ETSI: *European Telecommunications Standard Institute*.

⁹ TIA: *Telecommunications Industry Association*.

embargo, ETSI rápidamente comenzó a desarrollar un estándar abierto para sistemas PMR, conocido como *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA). El objetivo era establecer un sistema común para todos los países europeos, promoviendo un mercado competitivo con múltiples fabricantes de equipos de red y terminales, lo cual permitiría una reducción significativa de costes en comparación con las soluciones propietarias.

En la actualidad, la inmensa mayoría de sistemas PPDR han sido monopolizados por los eternos rivales TETRA y TETRAPOL, estando este último presente en 34 países, TETRA, con redes en 114 países a nivel global, y APCO P25, con redes principalmente en América del Norte [12].

Focalizándose en el contexto europeo, la figura 2-3 ilustra el despliegue de redes PPDR en distintos países, destacando el nivel de implementación y las tecnologías empleadas en cada uno.

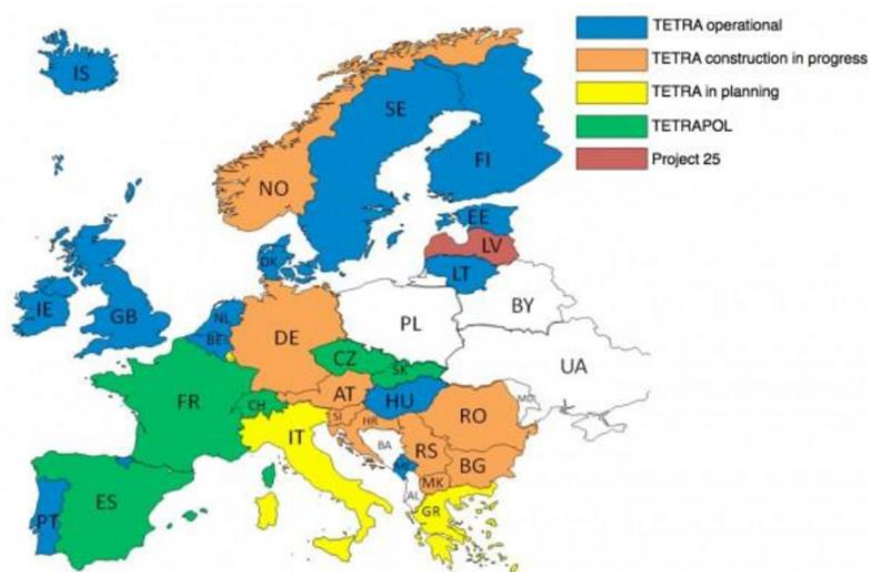


Figura 2-3 Redes de Seguridad Pública y Emergencias en Europa (tomada de [13]).

Es importante destacar que en países con redes de comunicaciones críticas ya consolidadas y operativas desde hace tiempo, como España, no se ha considerado un cambio de tecnología, a pesar de que esto podría facilitar enormemente la interoperabilidad entre redes. Sin embargo, esta decisión no es tan sencilla como podría parecer inicialmente, ya que cada proyecto de red nacional está influido por una multitud de factores determinantes (más allá de la mera elección tecnológica), lo que hace que cambiar el sistema de comunicaciones resulte un proceso extremadamente complejo, con niveles de riesgo que en muchas ocasiones son inasumibles para redes que son estratégicas en términos de seguridad ciudadana.

Una característica compartida por todas las soluciones más destacadas en el mercado actual de este tipo de redes (como TETRA, TETRAPOL y APCO P25) es que se basan en una tecnología de radio conocida como TRUNKING. El *trunking* es una técnica utilizada en sistemas de comunicación que permite compartir un conjunto limitado de recursos (como canales de radiofrecuencia) entre un gran número de usuarios. En lugar de asignar un canal específico a cada usuario, el sistema asigna dinámicamente los canales disponibles según la demanda en tiempo real.

Esta tecnología optimiza el uso de los recursos radioeléctricos (ancho de banda disponible) en situaciones donde hay un gran número de usuarios, siendo especialmente adecuada para organizaciones que operan en grupos, como las FCSE. La premisa fundamental de esta tecnología es que un usuario individual utiliza la red durante periodos de tiempo muy cortos, y que muchos usuarios no hacen uso del sistema simultáneamente pero permanecen a la escucha [14].

En un sistema convencional, las comunicaciones entre dos usuarios están predefinidas mediante un canal (frecuencia) dedicado. En cambio, en una red *trunking*, el sistema asigna dinámicamente todos los canales disponibles a los diferentes usuarios según sea necesario. Esta asignación se realiza mediante protocolos de señalización específicos como TETRA, TETRAPOL, P25, entre otros, cada uno con características particulares en cuanto a protocolo de comunicación y modulación de la señal [15].

En el contexto europeo, se ha establecido que TETRA y TETRAPOL son las tecnologías predominantes para las comunicaciones PPDR. Diversos estudios han comparado ambas, y aunque los resultados varían, suelen estar influenciados por aspectos técnicos, experiencias operativas en el terreno y, a veces, intereses comerciales. Para una visión imparcial, resulta útil revisar las conclusiones clave del análisis realizado por la Secretaría de Estado de Seguridad [16] sintetizado en la siguiente tabla:

Aspecto a Comparar	TETRAPOL	TETRA
Cobertura	Excelente cobertura, especialmente en interiores y entornos radioeléctricos adversos.	Requiere entre un 50% y 70% más de estaciones base para igualar la cobertura de TETRAPOL.
Eficiencia Espectral	Menos eficiente espectralmente, pero su rendimiento es comparable en redes con alta densidad debido a un mejor patrón de reuso de frecuencias.	Alta eficiencia espectral, ideal para redes con grandes necesidades de capacidad.
Capacidad de Datos¹⁰	Baja capacidad de transmisión de datos (2.4 Kbps en España).	Mayor capacidad de datos, especialmente en la versión avanzada TEDS, que alcanza hasta 400 Kbps.
Seguridad	Cifrado extremo a extremo robusto integrado en el sistema.	Ofrece varios niveles de seguridad, incluyendo cifrado de interfaz aire, pero el cifrado extremo a extremo depende de sistemas propietarios.
Gestión de la Movilidad	Menor flexibilidad en gestión de movilidad.	Gestión de movilidad (<i>handover</i>) más avanzada y efectiva.
Sistema Propietario	Sistema propietario, lo que limita la interoperabilidad y la competitividad en el mercado.	Sistema más abierto, con una industria competitiva en redes y terminales.
Flexibilidad	Menos flexible en la gestión de grupos de usuarios.	Gestión flexible de grupos, útil en operaciones dinámicas.
Capacidades de Voz	Priorización total de la transmisión de voz bajo cualquier circunstancia.	También prioriza la voz, pero con mejores capacidades para integrar transmisión de datos.
Evolución Tecnológica	No muestra una clara progresión hacia servicios de banda ancha en el corto o medio plazo.	Ofrece una hoja de ruta evolutiva más prometedora, pero sin avances significativos hacia la banda ancha.
Costes	Menor necesidad de estaciones base, lo que implica menores costos de infraestructura y operación.	Mayor número de estaciones base necesarias para igualar la cobertura, lo que incrementa los costos operativos.

Tabla 2-2 Comparativa TETRAPOL vs. TETRA (elaborada a partir de [16])

2.3 El Modelo de Operación como Clave del Éxito de un Sistema PPDR

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los factores clave que han convertido a SIRDEE en un modelo de referencia para la gestión de redes de seguridad pública y emergencias, fue la decisión estratégica del Ministerio del Interior a finales de los años 90 de optar por un modelo de basado en servicio para su implementación, despliegue, operación y mantenimiento.

¹⁰ Es este parámetro el que motiva la temática de este Trabajo Fin de Máster.

En ese momento, se consideraron dos enfoques de gestión y contratación para el Servicio Integral de Radiocomunicaciones Digitales de Emergencia del Estado:

- Modelo basado en red en propiedad: Tal y como es el caso de Francia en este modelo, la Administración asume la propiedad total de la infraestructura que soporta el sistema (incluyendo emplazamientos, estaciones base, red de transmisión/conmutación, terminales, etc.) y es responsable directa de su gestión y operación.
- Modelo basado en la prestación de un servicio: Al igual que SIRDEE, la red y todo el equipamiento asociado son propiedad de una operadora de telecomunicaciones. Esta compañía es la encargada de la gestión, mantenimiento y explotación de la red. En este esquema, el Ministerio del Interior, a través de la OP SIRDEE, supervisa los niveles de calidad contratados y se encarga de la gestión de usuarios, cifrado de comunicaciones, administración, economía, formación, además de aportar las frecuencias necesarias, previamente asignadas por el organismo regulador del espectro¹¹.

Un posible inconveniente del modelo finalmente adoptado, es la dependencia que ha surgido en estos 24 años de funcionamiento de SIRDEE respecto a la operadora Telefónica Móviles de España SAU, lo que complica significativamente un eventual cambio de proveedor.

Conscientes de este aspecto, se desestimó la primera opción (modelo en propiedad) debido a las implicaciones logísticas y operativas que conllevaba:

- Necesidad de disponer de un elevado número de emplazamientos y gestionar los arrendamientos correspondientes.
- Inversión inicial considerablemente alta, difícil de asumir, especialmente en contextos económicos adversos como el actual.
- Requerimiento de un numeroso equipo humano con alta calificación técnica.
- Es indispensable una estructura estatal para proporcionar apoyo logístico integral a la red.
- Riesgo de obsolescencia de la tecnología empleada en un plazo de aproximadamente 10 años.

Además, la experiencia en otras redes de seguridad y emergencias ha demostrado que, tras el despliegue del sistema, suelen surgir desafíos relacionados con el mantenimiento de equipos, formación, y evolución tecnológica. Estos aspectos son críticos para garantizar que los usuarios finales mantengan una percepción positiva del sistema que gestiona sus comunicaciones corporativas. Estos desafíos se agravan en escenarios económicos desfavorables, donde la disponibilidad de recursos es limitada. De otro lado, los procesos de contratación pública son lentos (y cada vez más tediosos), lo que impide una rápida adaptación a las necesidades de los usuarios. Hay que tener siempre en mente la naturaleza de este tipo de servicios, requieren soluciones inmediatas y efectivas [16].

La decisión estratégica de los antiguos responsables del SIRDEE de configurar el sistema como un servicio integral para las comunicaciones policiales ha mitigado en gran medida estos problemas.

Los contratos suscritos por la Administración desde el año 2000 incluyen no solo la operación y explotación de la red de radiocomunicaciones policiales, sino también el mantenimiento al usuario, soporte técnico, gestión, emisión de informes, y formación. Además, aseguran la disponibilidad plena de terminales y accesorios integrados en la red, conforme a los niveles de calidad y funcionalidades establecidas en los pliegos de prescripciones técnicas que rigen el servicio.

La tabla 2-3 recopila todos los contratos firmados hasta la fecha por el Ministerio del Interior en relación con el servicio SIRDEE, detallando los principales hitos alcanzados en cada uno. Todos estos contratos han sido adjudicados a la empresa mencionada anteriormente mediante un procedimiento

¹¹ En España, estas competencias están atribuidas a la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales encuadrada en el Ministerio Transformación Digital y Función Pública.

negociado sin publicidad y sin promoción de ofertas¹², debido a las características especiales de reserva y confidencialidad que deben considerarse en la licitación de una red de comunicaciones estratégica para la seguridad y la protección de los intereses esenciales del Estado, como es el caso de SIRDEE.

AÑO	CONTRATO NÚMERO	IMPORTE (€)	HITOS PRINCIPALES
2000 2001 2002 2003	1	216.364.357	DESPLIEGUE COMPLETO RED 35016 TERMINALES PROPIEDAD MI COBERTURA 90% TERRITORIO
2004 2005	PRORROGA CONTRATO 1	189.468.040	1460 ESTACIONES BASE 46445 TERMINALES PROPIEDAD MI
2006 2007 2008 2009	2	331.920.714	ADHESION DGT A SIRDEE CON UNA CONTRIBUCION ECONOM. DEL 7% 64407 TERMINALES PROPIEDAD DEL MI
2010 2011 2012 2013	3	340.000.000	ADHESION MINISTERIO DEFENSA A SIRDEE 69110 TERMINALES MI INICIO DESPLIEGUE HERRAMIENTA GESTION DE EMERGENCIAS EN SALAS 091 PN Y COS GC
2014 2015	PRORROGA CONTRATO 3	170.000.000	1502 ESTACIONES BASE (95 % COBERTURA) 71810 TERMINALES DEL MI
2016 2017 2018 2019	4	332.916.666	CONTINUACIÓN DESPLIEGUE HERRAMIENTA EMERGENCIAS 72810 TERMINALES (1000 DEL MINISDEF) MIGRACIÓN BACKBONE RED A IP RENOVACIÓN PLANTA RADIO (EBs y TERMINALES)
2020 2021	PRORROGA CONTRATO 4	166.458.333	FINALIZACIÓN DE LA MIGRACIÓN BACKBONE RED A IP Y RENOVACIÓN DE TERMINALES DESCATALOGADOS
2022 2023 2024	5¹³	247.916.666	MANTENIMIENTO DEL SERVICIO DE BANDA ESTRECHA CON LOS SLAs CARACTERÍSTICOS DE UNA RED PPDR
2025 2026	PRORROGA CONTRATO 5	177.083.333	ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL COMIENZO DE LA MIGRACIÓN HACIA UNA TECNOLOGÍA CON CAPACIDADES DE BANDA ANCHA

Tabla 2-3 Bitácora del servicio SIRDEE con sus principales hitos

Es importante destacar que estos contratos no solo abarcan los elementos de la red, sino también todos los equipos de comunicaciones instalados en las salas del 091 de las Comisaría Provinciales y Jefaturas Superiores de la Policía Nacional, así como en las salas COS¹⁴ de las distintas Comandancias de la Guardia Civil, incluido el mobiliario de los puestos de operador, todos ellos propiedad de la compañía prestataria del servicio.

Hasta el año 2016, los terminales de radio que formaban parte del sistema, unos 72.000 aproximadamente, eran la única excepción a la propiedad de la infraestructura, ya que pertenecían al

¹² Hecho al que Abogacía del Estado cada vez pone más reparos para no comprometer la libre competencia.

¹³ Conforme al art. 29 de la Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, estos podrán tener una duración máxima de 5 años incluidas sus prórrogas. Por esta razón el contrato 5 pasó de 4 a tres años de duración (pensando en una potencial prórroga del mismo de 2 años).

¹⁴ COS: Centro Operativo de Servicio son las salas de mando y control de GC.

Ministerio del Interior. Sin embargo, su mantenimiento siempre estuvo cubierto por el contrato SIRDEE desde el inicio.

Es a partir de enero de 2016, cuando esta situación comenzó a cambiar, llegando a enero de 2022 (coincidiendo con el comienzo del quinto contrato) con todos los terminales incluidos en el servicio contratado, actualmente proporcionado por Telefónica Móviles SAU [17].

2.4 El Sistema PPDR Español de Nuestras FCSE

A finales de los años 90, el Ministerio del Interior decidió modernizar las comunicaciones de las FCSE mediante la implementación de un nuevo sistema que solucionara las limitaciones de las redes de radio analógicas existentes hasta entonces. Estas redes presentaban problemas significativos, como operar en diferentes bandas de frecuencia, ofrecer coberturas discontinuas y aisladas, tener una capacidad limitada, carecer de cifrado en las comunicaciones, y no permitir la transmisión de datos, lo que comprometía la seguridad y la eficiencia de las comunicaciones.

Estas deficiencias, cruciales para la operatividad de las FCSE, impedían la necesaria coordinación entre los diferentes cuerpos que las integran, así como la colaboración con otras unidades del Ministerio del Interior o de otras áreas de la Administración con competencias en seguridad ciudadana y emergencias.

Es importante subrayar que esta decisión marcó un avance innovador. Aunque en la actualidad tanto TETRA como TETRAPOL se consideran tecnologías maduras, validadas y ampliamente adoptadas por las Fuerzas de Seguridad en países de nuestro entorno, en aquel momento representaban un desafío considerable. Las tecnologías no estaban completamente desarrolladas y no se disponía de experiencias previas en cuanto al despliegue, operación y funcionamiento de redes similares. Sin embargo, a pesar de estos desafíos iniciales, el SIRDEE ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta esencial y altamente valorada por las organizaciones usuarias.

Este sistema de radiocomunicaciones ha supuesto un salto cualitativo significativo en las comunicaciones policiales, logrando mitigar en gran medida las deficiencias de los sistemas anteriores [16]:

- Transición de redes analógicas a digitales: La implementación del SIRDEE permitió que las FCSE adoptaran por primera vez un sistema basado en tecnología digital. Esto aportó numerosas ventajas inherentes, como la simplificación en la gestión de los sistemas, una mayor resistencia al ruido y las interferencias, una integración más sencilla con otros sistemas y la reducción de costes operativos.
- Uniformidad tecnológica y de frecuencias: Antes de la llegada del SIRDEE, las FCSE utilizaban distintas tecnologías y bandas de trabajo. Sin embargo, con su implementación, tanto la Policía Nacional como la Guardia Civil (y otras organizaciones usuarias, como se detallará más adelante) adoptaron el SIRDEE como su única herramienta de comunicación. Esto ha facilitado enormemente la coordinación y colaboración entre diferentes cuerpos que intervienen en un mismo dispositivo o incidente de seguridad/emergencia, incluso si pertenecen a organizaciones distintas.
- Cobertura limitada y fragmentada: Antes del despliegue del SIRDEE, la Policía Nacional solo contaba con una cobertura aceptable en grandes ciudades, mientras que la Guardia Civil, cuyo ámbito de actuación se centra en zonas rurales, enfrentaba una cobertura muy limitada. El despliegue completo del SIRDEE cambió esta situación drásticamente, proporcionando una cobertura radio que abarca aproximadamente el 90% del territorio nacional e incluyendo cobertura *indoor* en edificios en ciertos entornos urbanos. Esta mejora en la cobertura fue crucial para el éxito del sistema.
- Limitaciones en la transmisión de datos: Aunque la velocidad de transmisión de datos proporcionada por la tecnología TETRAPOL en el SIRDEE (2.4 Kbps) es baja en

comparación con los estándares actuales, resulta suficiente para funciones esenciales como el envío de mensajes cortos o el posicionamiento de vehículos policiales, características que anteriormente no estaban disponibles.

- Seguridad en las comunicaciones: El SIRDEE está dotado de un sistema complejo de gestión de claves, que son periódicamente inyectadas tanto en la red como en los terminales de radio por operadores autorizados. Este proceso se realiza en instalaciones dedicadas que cuentan con medidas de seguridad especiales, siguiendo procedimientos normalizados y establecidos por la Oficina del Programa SIRDEE. Estas medidas garantizan un alto nivel de seguridad, protegiendo las comunicaciones contra posibles escuchas no autorizadas.
- La naturaleza estratégica de una red como el SIRDEE es indiscutible, considerando la misión constitucional de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, que incluye la protección del libre ejercicio de derechos y libertades y la garantía de la seguridad ciudadana. En este contexto, el uso de un sistema de comunicaciones seguro y de alta disponibilidad es esencial y fundamental para el cumplimiento de esta misión, lo que hace que su importancia sea incuestionable.

2.4.1 Los Sistemas PPDR de Nuestro Entorno en Términos Económicos

Un aspecto a menudo subestimado, especialmente por los usuarios finales, pero crucial en el despliegue, mantenimiento y operación de grandes sistemas TIC como SIRDEE, es el de los costes económicos. Esto es especialmente relevante en contextos de restricciones presupuestarias, como los que han acontecido en nuestro país después de la pandemia mundial de COVID-19.

Al revisar los datos presentados en la tabla 2-3, queda claro que la red SIRDEE representa un impacto económico significativo dentro del presupuesto asignado al Ministerio del Interior. De hecho, desde el punto de vista financiero, es el contrato más relevante dentro de este ministerio.

Inicialmente, los aproximadamente 85 millones de euros que cuesta anualmente el servicio SIRDEE pueden parecer excesivos. Sin embargo, si se considera la magnitud de esta red y se aplica un simple análisis de escala, la percepción cambia. La red presta servicio a unos 75.000 terminales, lo que implica un coste del servicio de unos 94 euros por terminal y mes. Teniendo en cuenta que la red está respaldada por un sistema integral de mantenimiento, que los terminales (y toda la red) operan 24 horas al día, y que no hay restricciones en el tráfico de voz y datos, se puede concluir que el servicio SIRDEE no es tan costoso como podría parecer en un primer momento.

A pesar de esto, en 2013 la OP SIRDEE llevó a cabo un estudio comparativo con otras redes de emergencias en países vecinos para evaluar los costes operativos de la red SIRDEE y, si fuera necesario, ajustar los precios en futuras contrataciones. Los valores mostrados en las tablas 2-4, 2-5 y 2-6 [18], se basan en datos de licitaciones públicas, información recopilada por la OP SIRDEE en visitas a responsables de otras redes de seguridad y emergencias, y datos disponibles públicamente.

MEDIAS EUROPEAS

	Cobertura por EB	Coste por km2 cubierto y año	Coste para cubrir España. Criterio km2	Coste por EB desplegada y año	Coste para cubrir España. Criterio 3300 EB TETRA	Coste por hab / año
Unidades	km2/EB	€ /año	M€ /año	€ / año	M€	€
Media TETRA Global	138	618	320	85.379	277	5,1
Media TETRA España	244	237	120	57.860	175	1,6
Media TETRAPOL Global	338	182	92	60.488	92	1,6
SIRDEE	341	141	71	47.900	71	1,4

Tabla 2-4 Densidad Económica del Sistema PPDR Nacional (tomada de [18])

COMPARATIVA EUROPA	Inglaterra	Alemania	Italia	Portugal	España
	Airwave	BOSNET			SIRDEE
Presupuesto M€	6.800	4.500	3.000	450	993
Tecnología	TETRA	TETRA	TETRA	TETRA	TETRAPOL
Superficie Cubierta Km ²	244.820	357.021	301.340	92.120	504.782
Nº Estaciones Base (BS)	3.600	4.500	3.000	500	1.483
Terminales	150.000	300.000	100.000	20.000	69.000
TR inc. Contrato	NO	NO	NO	NO	SI
Duración del Contrato (años)	19	10	10	10	14
Coste anual M€	358	450	300	45	71
Coste por EB año	99.415 €	100.000 €	100.000 €	90.000 €	47.828 €
Coste por terminal y año	2.386 €	1.500 €	3.000 €	2.250 €	1.028 €
Coste por Km ² y año	1.462 €	1.260 €	996 €	488 €	141 €
Km ² /EB	68	79	100	184	341
EB/10,000 km ²	147	126	100	54	29

Tabla 2-5 Coste de Algunos Sistemas PPDR de Nuestro Entorno (tomada de [18])

COMPARATIVA ESPAÑA (1)	Madrid	Navarra	Canarias	Andalucía estimado	Valencia
Presupuesto M€	12	5	12	145	54
Tecnología	TETRA	TETRA	TETRA	TETRA	TETRA
Nº Estaciones Base (BS)	90	35	70	352	140
Terminales	5.000	1.300	2.000	4.000	4.000
TR inc. Contrato	SI	NO	NO	NO	NO
Duración del Contrato (años)	2	4	4	10	10
Coste anual M€	5,9	1,3	2,9	14,5	5,4
Coste por EB año	66.000 €	35.714 €	41.071 €	41.193 €	38.914 €
Coste por terminal y año	1.188 €	962 €	1.438 €	3.625 €	1.362 €
Superficie Cubierta Km ²	8.028	10.391	7.447	87.468	23.255
EB/10,000 km ²	112	34	94	40	60
Km ² /EB	89	297	106	248	166
Coste por Km ² y año	740 €	120 €	386 €	166 €	234 €

COMPARATIVA ESPAÑA (2)	Galicia	Baleares	Castilla La Mancha estimado	Murcia	Cataluña
Presupuesto M€	5	3	8	4	80
Tecnología	TETRA	TETRA	TETRA	TETRA	TETRA
Nº Estaciones Base (BS)	70	41	105	21	218
Terminales	1.700	1.700	2.000	1.000	21.000
TR inc. Contrato	NO	NO	NO	NO	NO
Duración del Contrato (años)	3	2	2	4	4
Coste anual M€	1,8	1,5	3,9	1,0	20,0
Coste por EB año	25.000 €	35.366 €	36.952 €	48.214 €	91.743 €
Coste por terminal y año	1.029 €	853 €	1.940 €	1.013 €	952 €
Superficie Cubierta Km ²	29.574	4.992	79.463	11.313	32.114
EB/10,000 km ²	24	82	13	19	68
Km ² /EB	422	122	757	539	147
Coste por Km ² y año	59 €	290 €	49 €	89 €	623 €

Tabla 2-6 Coste de Algunos Sistemas PPDR de Nuestro País (tomada de [18])

A partir de los datos presentados, se puede concluir que los costes de operación de la red SIRDEE se encuentran entre los más bajos en muchos de los indicadores comparados con redes similares en nuestro entorno. Además, es importante destacar que muchas de las redes comparadas no incluyen en sus costes varios servicios que sí están cubiertos en SIRDEE, tales como:

- Mantenimiento integral de todo el sistema.
- Salas de Mando y Control y su equipamiento asociado.

- Sistema de seguridad dedicado e integrado.
- Formación continua para los usuarios.
- Emplazamientos, salas de conmutadores y suministro de alimentación de emergencia.
- Red de transporte.

2.5 Conclusiones del Capítulo

A lo largo de este capítulo 2, se han presentado argumentos clave para contextualizar el estado actual del sistema que soporta las comunicaciones operativas de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, conocido como SIRDEE.

Eventos como grandes desastres naturales, atentados terroristas, accidentes de gran magnitud y, en general, situaciones de emergencia que exigen una respuesta rápida y coordinada por parte de distintos servicios públicos, subrayan la importancia de disponer de sistemas de comunicaciones de uso exclusivo que aseguren una alta disponibilidad en cualquier circunstancia, ya sea ordinaria o extraordinaria.

Estas redes, denominadas PPDR, poseen una serie de características distintivas en comparación con las redes de uso general. Estas características permiten a los servicios de seguridad y emergencias actuar de manera efectiva, minimizando riesgos y garantizando una respuesta adecuada ante situaciones críticas. Entre estas características destacan: alta disponibilidad, robustez, seguridad, fiabilidad y estabilidad.

3 DESARROLLO DEL TFM

3.1 Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo 3 se pretende identificar los elementos clave a considerar y las decisiones estratégicas que deben tomarse en cuenta a la hora de planificar la evolución de los sistemas actuales en banda estrecha.

La transición hacia redes PPDR de banda ancha (*Broad Band* PPDR, en adelante BB-PPDR) plantea varios desafíos para los actores involucrados: los fabricantes deben adaptar su tecnología a las particularidades de estas redes de seguridad pública y emergencias, los usuarios deben prever los caminos de evolución tecnológica y los gobiernos necesitan establecer un marco legal adecuado y asignar los recursos necesarios para su despliegue y operación.

Estos factores son fundamentales, ya que su análisis permitirá evaluar la viabilidad de dicha evolución y, por ende, verificar la hipótesis principal planteada en este TFM.

3.2 Requisitos para las Potenciales Tecnologías de Evolución

La introducción del estándar de comunicaciones móviles *Long Term Evolution*, (LTE) en 2010 destacó los beneficios de utilizar redes 4G para seguridad pública y emergencias. Pese a la incursión del 5G, LTE ha sido reconocida en multitud de foros internacionales y grupos de trabajo especializados, como el *Radio Expert Communication Group*¹⁵ (RECG), como la evolución natural de los sistemas tradicionales, como TETRA y TETRAPOL.

LTE y 5G ofrecen una solución moderna que responde a las crecientes demandas de transferencia masiva de información, proporcionando mayores velocidades de transmisión y menor latencia, lo que mejora significativamente la operatividad en entornos críticos.

La implementación de una red de banda ancha en este contexto permitiría mejorar significativamente la interacción entre los terminales portátiles utilizados por las patrullas operativas en el terreno y los sistemas de información en las salas de mando y control de las FCSE. Los beneficios incluirían [16]:

- Incrementar el número de elementos geolocalizados y optimizar la frecuencia de actualización de dicha información.

¹⁵ Radio Expert Communications Group. Organismo de la Unión Europea encuadrado dentro del Law Enforcement Working Party del Consejo de Europa con la misión fundamental de armonizar y estandarizar soluciones comunes para las redes PPDR dentro del marco europeo y del que forma parte el Ministerio del Interior.

- Agilizar y enriquecer las consultas de personas y vehículos, tanto en la solicitud como en la respuesta, mediante el uso de datos, fotos, vídeos y formularios.
- Habilitar el envío de vídeo en tiempo real o de secuencias específicas desde el lugar de los hechos, con distribución a terminales seleccionados.
- Integrar aplicaciones de información, operación, mando y control dentro de las operaciones en curso.
- Facilitar el desarrollo y despliegue de aplicaciones en dispositivos y terminales basados en sistemas operativos abiertos y de amplio uso en el ámbito civil, como Android, iOS o Windows.

Las redes de banda ancha para uso comercial están experimentando un despliegue masivo a nivel global, siguiendo los estándares definidos por el *Third Generation Partnership Project*¹⁶ (3GPP). Este factor resulta altamente ventajoso para su implementación en aplicaciones de seguridad y emergencias, ya que permite aprovechar las economías de escala, reduciendo significativamente los costos de despliegue.

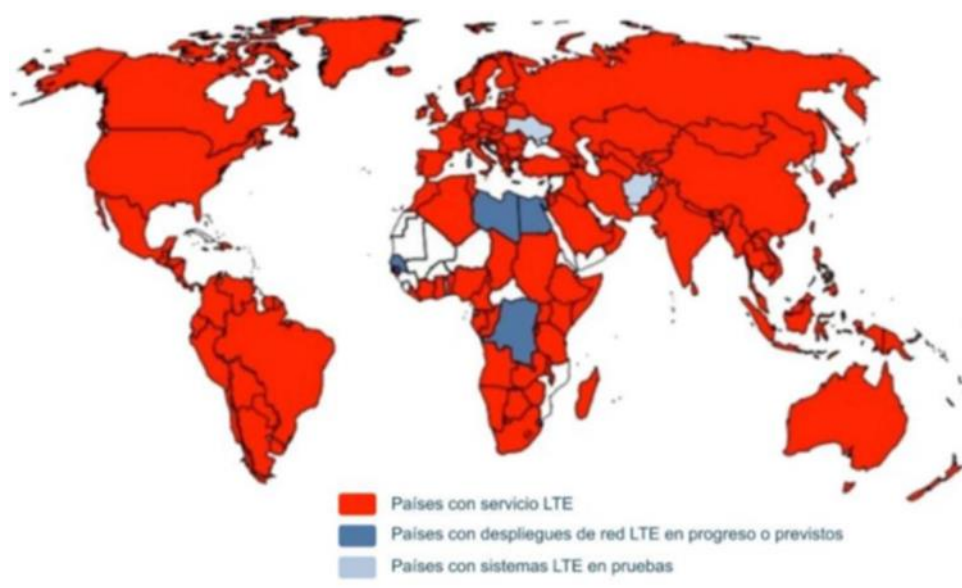


Figura 3-1 Despliegue de redes LTE en el mundo (tomada de [19]).



Figura 3-2 Despliegue mundial de las redes 5G (tomada de [20]).

¹⁶ 3GPP: Organismo fundado en 1988 con el fin de generar especificaciones e informes técnicos para definir un nuevo sistema de comunicaciones móviles en esa época, el conocido como 3G.

Como ya se comentó en el capítulo anterior, el estado de involución en el que se encuentra la tecnología TETRAPOL trae como inevitable consecuencia el hecho de que la evolución de SIRDEE hacia capacidades de banda ancha estará basada en una de las tecnologías definidas en el 3GPP.

No obstante, dadas las especificidades operativas de los servicios de seguridad pública y emergencia, es imprescindible realizar una adaptación tecnológica conocida comúnmente como *Broad Band for Emergencies* (E-BB). Esta adaptación resulta absolutamente indispensable, ya que las versiones de LTE, 5G implementadas hasta el momento en redes comerciales (*releases* 3GPP) no incluyen ciertas funcionalidades críticas que son esenciales para las redes PPDR. Estas características, en cambio, sí están integradas en las tecnologías de *trunking* tradicionales, como TETRA y TETRAPOL. Las funcionalidades en cuestión se detallan en la siguiente tabla 3-1, comenzando su implementación a partir de la *release* 13 y sucesivas:

	Trunking Convencional	LTE Comercial	Importancia
Calidad del PTT	Media	Baja	Notable
Tiempo de Establecimiento	350 ms	1seg (variable, no garantizado por red)	Crítica
Capacidad de grupos y usuarios	Muy alta	Variable (sin garantizar recursos radio)	Crítica
Priorización en el acceso	Si	No	<u>Muy Crítica</u>
Llamada de Emergencia	Si	No	<u>Muy Crítica</u>
Modos Degradados	Si	No	<u>Muy Crítica</u>
Alcance Cobertura	40-75Km (en banda B31)	4-15 Km (en 2.1 GHz)	Muy Notable a la hora del diseño de una Red Nacional
Modo Directo	Si	No	<u>Muy Crítica</u>
Modo Repetidor Independiente	Si	No	<u>Muy Crítica</u>

Tabla 3-1 Funcionalidades PPDR que han de ser implementadas en tecnologías 3GPP, (tomada de [21])



Figura 3-3 Roadmap de la evolución del estándar LTE (tomada de [22]).

Como ya se ha argumentado en este mismo apartado, la evolución inicial de los sistemas PPDR de banda estrecha estará basada en un estándar 3GPP. Las figuras 3-3, 3-4 así como la tabla 3-2, muestran el plan de evolución o *roadmap* previsto por el 3GPP para implementar funcionalidades de misión crítica sobre las tecnologías LTE y 5G con estimaciones temporales.

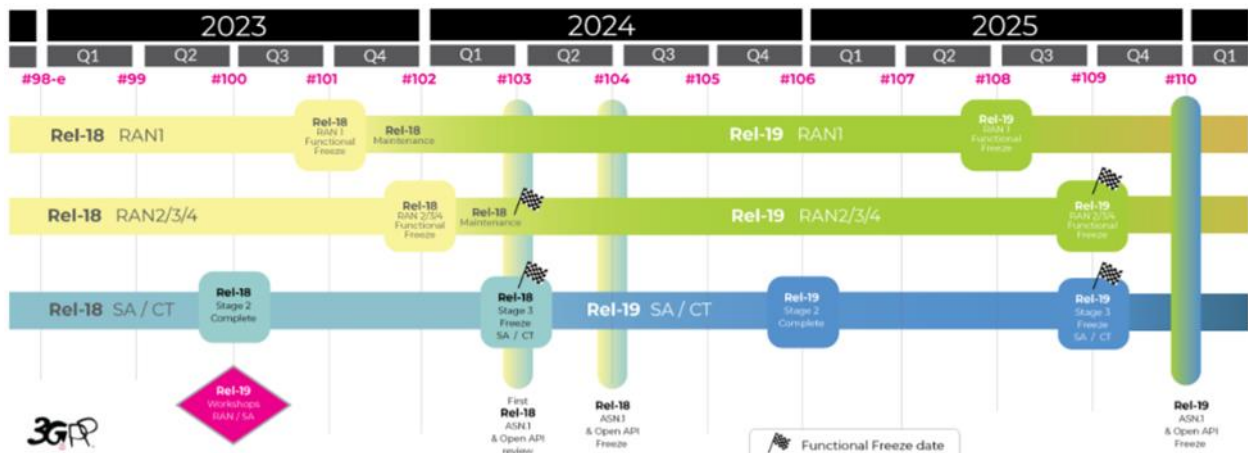


Figura 3-4 Evolución de las releases 3GPP (tomada de [23]).

	Release 3GPP Inicial	Especificación 3GPP	Última actualización
Req. Comunes para servicios MC	Rel.14	TS 22.280	Rel.19 (2024)
MCPTT (Push To Talk)	Rel.13	TS 22.179	Rel.19 (2024)
IOPS (Isolated E-UTRAN Operation for PS)	Rel.13	TS 22.346	Rel.18 (2024)
ProSe (modo directo)	Rel.12	TS 23.303	Rel.18 (2024)
eMBMS	Rel.5/14	TS 23.246	Rel.18 (2024)
MCVideo	Rel.14	TS 22.281	Rel.18 (2024)
MCDATA	Rel.14	TS 22.282	Rel.18 (2024)
Seguridad Extremo a Extremo para MC	Rel.14	TS 33.180	Rel.18 (2024)
eMBMS para MC	Rel.15	TS 23.246	Rel.18 (2024)
MCx - MCx	Rel.16	TS 24.885	Rel.16 (2018)

Network Slicing	Rel.15	TS 28.530	Rel.18 (2024)
Interworking con sistemas legacy	Rel.15	TS 23.283	Rel.19 /2024)
API eMBMS para MC	Rel.16	TS 23.479	Rel.18 (2024)
Sidelink	Rel.17 Rel.18	TS 38.836 TS 33.740	Rel.17 (2021) Rel.18 (2023)
Non-Terrestrial Networks	Rel.16	TS 38.821	Rel.16 (2023)
Mejoras en ahorro de energía en terminales	Rel.16	TS 38.840	Rel.16 (2019)
Soporte de UAS	Rel.17	TS 23.255 TS 23.256	Rel.19 (2024)
MC over 5MBS	Rel.17	23.289	Rel.19 (2024)
MC Over 5G Prose	Rel.17	23.289	Rel.19 (2024)

Tabla 3-2 Funcionalidades de misión crítica vs. *releases* 3GPP (elaborada a partir de [22], [23]).

A modo de ejemplo, especificaciones relacionadas con las comunicaciones críticas, como *el Push-to-Talk* (PTT) y comunicaciones en modo directo *Device to Device* (D2D), se introdujeron en los años 2015-2016 con las versiones 12 y 13 del estándar. Sin embargo, su implementación real por parte de las empresas de telecomunicaciones ha sido posterior. Aún hoy en día, algunas de estas funcionalidades no se encuentran completamente implementadas.

3.3 Decisión sobre el Modelo de Operación

Las redes PPDR se diseñan priorizando la cobertura, asegurando que las áreas críticas, que requieren atención especial por motivos de seguridad, estén adecuadamente cubiertas, más que enfocarse en la densidad de población. En muchos casos, el desafío en la planificación se centra más en garantizar una cobertura efectiva que en proporcionar una alta capacidad. De hecho, la proporción entre el número de usuarios de la red y la cantidad de estaciones base es considerablemente menor que en las redes comerciales. Estas particularidades influyen en las estrategias de despliegue y operación posibles para las redes de emergencia de banda ancha [24].

La selección de una opción u otra está fuertemente condicionada por factores limitantes de tipo económico, normativo y tecnológico, como se analizará a lo largo de este capítulo.

3.3.1 Infraestructura PPDR basada en Redes Dedicadas

La red está diseñada específicamente para satisfacer los requisitos únicos de las comunicaciones PPDR y se implementa utilizando equipos y recursos dedicados en exclusividad a estos fines. La

propiedad de la red puede estar en manos de un operador o del propio usuario¹⁷, pero la infraestructura no se comparte para otros usos. Es necesario disponer de espectro exclusivo para las comunicaciones BB-PPDR (*Broad Band PPDR*).

Las ventajas de un diseño de infraestructura de red dedicada PPDR son, entre otras, las siguientes [14]:

- La limitada dependencia de la infraestructura de redes móviles comerciales ha demostrado ser crucial en operaciones PPDR durante crisis o grandes eventos, donde las redes comerciales suelen verse comprometidas o sobrecargadas.
- Las redes dedicadas son, sin duda, la solución más fiable para comunicaciones de misión crítica, garantizando mayor integridad, disponibilidad del servicio y su resiliencia en general.
- Las bandas de frecuencia dedicadas permiten desplegar redes específicas que cumplen con los estrictos requisitos de seguridad nacional y proporcionan los servicios especializados y la fiabilidad que exige el entorno PPDR, beneficiándose a su vez de las sinergias con los estándares de la banda ancha móvil comercial.

No obstante, las redes dedicadas presentan desafíos significativos, entre los que destacan los elevados costes de inversión y operación, así como la necesidad de disponer de espectro exclusivo.

3.3.2 Infraestructura PPDR basada en Redes Comerciales

En este modelo, los servicios móviles de banda ancha son adquiridos a uno o varios operadores comerciales de red móvil, sin necesidad de espectro específico para BB-PPDR. Los servicios se ofrecen a través de la infraestructura pública del operador comercial, sin requerir una red dedicada para los usuarios PPDR.

Para desplegar una red de emergencias a nivel nacional bajo este enfoque, es imprescindible un acuerdo de *roaming* nacional que permita a los terminales PPDR acceder a otras redes en caso de fallo de la red principal o cuando el usuario se encuentre fuera de su cobertura. Dado que las comunicaciones de emergencia son críticas, los servicios contratados deben cumplir con requisitos especiales relacionados con la calidad del servicio (también denominado *Quality of Service*, QoS).

El operador comercial, además, debe garantizar soporte a servicios especializados para usuarios PPDR, como llamadas de grupo y acceso prioritario, y también podría necesitar ofrecer mayores niveles de seguridad y disponibilidad a través de un diseño más robusto de la red.

Las ventajas de esta solución basada en la infraestructura comercial incluyen:

- Ofrece un menor coste de despliegue y operación, ya que estos gastos se distribuyen entre todos los usuarios de la red, siendo los usuarios PPDR solo una pequeña parte.
- El tiempo de implementación es más reducido.
- Cubre las necesidades de transmisión de datos no críticos para los usuarios PPDR dentro del área de cobertura de las redes comerciales, incluso sin disponer de funcionalidades específicas PPDR como resiliencia o prioridad.
- No es necesario contar con espectro dedicado para BB-PPDR.

Entre las desventajas se encuentran:

- En la mayoría de los casos, las redes comerciales están diseñadas para satisfacer las demandas del mercado general, sin considerar las particularidades y exigencias de los usuarios PPDR.

¹⁷ Como quedó expuesto en el capítulo anterior, en una red de cobertura de ámbito nacional es necesario el modelo de servicio proporcionado por un operador de telecomunicaciones.

- Los gobiernos tienen una influencia limitada en el desarrollo y evolución de la red comercial, dado que el operador comercial también debe atender otros intereses aparte de las necesidades de los usuarios PPDR.

Aunque se ha empezado a tomar medidas regulatorias y normativas en países de nuestro entorno, en España aún no existe un marco legal que permita el *roaming* entre operadores ni una normativa que exija mecanismos de priorización para los usuarios PPDR frente al resto de usuarios de un operador comercial específico. Por tanto, estos condicionantes dificultan mucho la elección de una configuración basada en redes únicamente comerciales como un modelo viable para la evolución de SIRDEE ¹⁸ en el contexto actual.

3.3.3 Infraestructura PPDR basada en Redes Híbridas

Esta tercera opción propone el uso combinado de infraestructura dedicada y comercial. La solución de infraestructura compartida puede ser una alternativa viable para ofrecer servicios BB-PPDR en el futuro, especialmente en países con grandes áreas rurales o baja densidad poblacional. Construir redes BB-PPDR dedicadas puede resultar demasiado costoso para la sociedad, y una forma de mitigar este desafío es que los usuarios de este tipo de redes utilicen servicios móviles comerciales en determinadas zonas.

La parte comercial de la red cubriría las necesidades de transmisión de datos no críticos para los usuarios PPDR en áreas con cobertura comercial, incluso sin características específicas como resiliencia o prioridad. Sin embargo, en las zonas de interés operativo-policial, sería esencial contar con cobertura de la red dedicada.

Este modelo de despliegue y operación incrementa la complejidad en la gestión de la red en comparación con soluciones exclusivamente dedicadas o basadas únicamente en redes comerciales. Existen diferentes arquitecturas que ofrecen distintos niveles de integración y tiene implicaciones específicas tanto a nivel técnico como operativo, especialmente cuando se consideran las necesidades de comunicaciones PPDR. Las tres principales se describen someramente a continuación [25].

La arquitectura *Multi-Operator Radio Access Network* (MORAN), los operadores comparten tanto la infraestructura de acceso radio (RAN) como los emplazamientos de las antenas, pero utilizan sus propias bandas de frecuencia y gestionan de forma separada el espectro. Los *cores* también se mantienen separados en este modelo.

En el modelo *Multi-Operator Core Network* (MOCN), los operadores móviles comparten la infraestructura de acceso radio (RAN), pero mantienen *cores* completamente separados. Los usuarios de cada operador acceden a la misma red de acceso radioeléctrica (estaciones base), pero son gestionados por *cores* de red independientes que pertenecen a cada operador.

Gateway Core Network (GWCN) es el modelo de compartición más profundo, donde los operadores comparten tanto la red de acceso radioeléctrico (RAN) como algunos elementos clave de la red *core*, como los *gateways* de acceso. Esto implica una mayor integración y menor diferenciación entre los operadores en cuanto a la gestión de tráfico y red.

CONFIGURACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
MORAN	Ahorro en costes de despliegue y operación al compartir la infraestructura física (antenas, estaciones base).	No optimiza el uso del espectro, ya que cada operador sigue utilizando bandas de frecuencia separadas.
	Mantiene la autonomía de los operadores en la gestión del espectro y del tráfico en sus	Aún requiere coordinación en la gestión de la infraestructura compartida.

¹⁸ Ver Anexo 2 pregunta 8 para contrastar la diferencia entre las conclusiones alcanzadas por las SES y la percepción mayoritaria que tienen los usuarios finales encuestados en cuanto al uso de redes comerciales como alternativa a SIRDEE.

MOCN	propias redes núcleo.	No proporciona mejoras significativas en la capacidad de red respecto al espectro.
	Menos complejidad que MOCN en la gestión de espectro, ya que cada operador usa sus propias bandas.	
	Ahorro en costes de infraestructura al compartir la red de acceso radio (RAN).	Implementación técnica compleja debido a la coordinación necesaria en la gestión de recursos y espectro.
	Optimización del uso del espectro compartido.	
GWCN	Flexibilidad para los operadores, ya que mantienen redes, cores separados y autonomía sobre los servicios y seguridad.	No se comparten recursos del núcleo de red, lo que implica inversiones separadas por parte de cada operador en su núcleo.
	Mayor optimización de recursos al compartir tanto la infraestructura de acceso radio como parte del núcleo de la red (gateways).	Requiere una mayor coordinación y cooperación entre operadores.
	Menores costes operativos en áreas de baja densidad de usuarios.	Menor flexibilidad para los operadores en la gestión independiente de servicios y tráfico, ya que comparten parte del núcleo de la red.
	Simplificación de la operación en zonas rurales y con baja demanda.	Complejidad técnica elevada, especialmente en la configuración y gestión de los recursos compartidos.

Tabla 3-3 MORAN vs. MOCN vs. GWCN (elaborada a partir de [25]).

A la vista de las características de cada una y tomando conciencia de que las redes PPDR, por su naturaleza crítica y los altos requisitos de seguridad, disponibilidad y priorización, presentan desafíos específicos cuando se busca aprovechar infraestructuras compartidas con redes comerciales, al comparar estos modelos para aplicaciones PPDR [25]:

- MOCN y MORAN ofrecen cierta independencia a los usuarios PPDR, ya que permiten mantener una separación completa o parcial del núcleo de la red. Esto facilita una mayor personalización de los servicios críticos y la implementación de mecanismos de seguridad avanzados, lo cual es crucial en redes de misión crítica.
- GWCN, aunque más eficiente en cuanto a la compartición de recursos, puede ser menos adecuado para redes PPDR debido a la integración profunda de la infraestructura de red núcleo, lo que podría afectar la independencia y control de los servicios PPDR en escenarios críticos.

Una vez más, la elección del modelo de compartición dependerá en gran medida de las necesidades específicas de las redes PPDR, el contexto económico y regulatorio del país y los niveles de seguridad y resiliencia requeridos para estas comunicaciones de misión crítica.

3.4 Factores Condicionantes y/o Limitantes

3.4.1 El Presupuesto Económico Disponible

Como se mencionó en el capítulo anterior, el presupuesto destinado a la red SIRDEE actual, que opera con funcionalidades de banda estrecha, representa un impacto económico significativo en los recursos asignados al Ministerio del Interior.

El mercado de equipos y servicios PPDR se enfrenta a una alta fragmentación, lo que implica costes elevados que podrían suponer una carga considerable en los presupuestos, a menos que se adopte e implemente una política global común que cumpla con los requisitos nacionales [14].

Por esta razón, el coste de desplegar una red dedicada BB-PPDR y con una cobertura similar a la que actualmente ofrece SIRDEE es extremadamente elevado. De hecho, resulta casi imposible calcular

un precio exacto, por lo que se requiere hacer estimaciones basadas en modelos predefinidos para evaluar su viabilidad financiera [26]. Una de estas estimaciones se presenta en la ilustración 3-5.

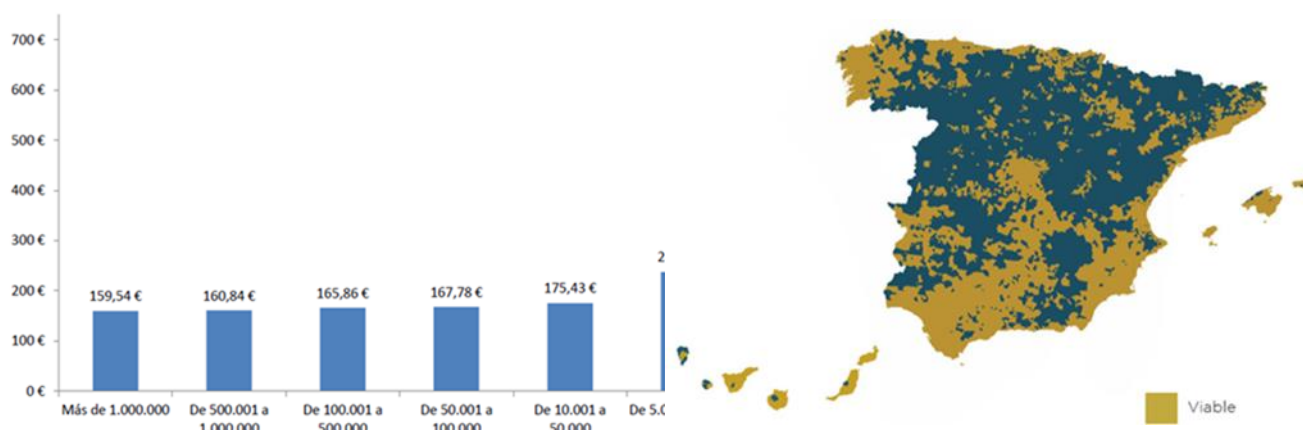


Figura 3-5 Izqda.; Inversión necesaria por hogar y tamaño de municipio para el despliegue de una red LTE. Dcha.: estudio de viabilidad económica territorial, (tomadas de [26]).

Se puede concluir que, a medida que la red se expande más allá de las áreas urbanas, donde se concentra la mayor parte de la población en nuestro país, los costes aumentan de manera exponencial, coincidiendo principalmente con las zonas operativas de la Guardia Civil.

Estos factores hacen que una infraestructura basada en redes híbridas, (descritas en el apartado anterior), se presente como una solución de compromiso. Esta opción permite implementar soluciones integradas que combinan voz y datos de misión crítica con la transmisión de datos en banda ancha a través de redes comerciales de amplia cobertura, todo ello con costes más asumibles.

3.4.2 La Ausencia de Normativa Nacional en Materia de QPP¹⁹

Como ya ha sido argumentado en este TFM, el despliegue de una solución híbrida, compuesta por una red privada con cobertura nacional para comunicaciones en el ámbito de la seguridad y emergencias, apoyada en el uso de las redes comerciales de banda ancha, para permitir adelantar la disponibilidad de nuevas funcionalidades *business critical* es una primera potencial aproximación a la estrategia de transición de la actual red SIRDEE de banda estrecha.

El principio de neutralidad de red, es el principio según el cual los proveedores de servicios de internet (PSI) tratan todo el tráfico en línea de forma igualitaria y abierta, sin discriminación, bloqueo, restricción o priorización [27].

Hay que tener presente que en España las redes comerciales no están preparadas para proveer un servicio de alta disponibilidad y resiliencia, como necesitan las FCSE (y que por el contrario si provee la red SIRDEE); pero podrían ser empleadas de forma simultánea a la red de banda estrecha que garantiza actualmente el servicio de voz en situaciones críticas.

Para hacer posible esta situación, los operadores de redes comerciales deberían destinar parte de su espectro a garantizar las comunicaciones procedentes de los servicios de emergencias y seguridad pública, priorizando el acceso al servicio de la red comercial a las comunicaciones procedentes de las agencias de seguridad pública y emergencias frente a los usuarios civiles, e incluso rechazar las peticiones de servicio de estos últimos para garantizar el servicio en el caso de una situación de emergencia.

¹⁹ Quality of Service, Priority & Preemption: mecanismos que aseguran que las comunicaciones de emergencia puedan mantenerse incluso en condiciones de alta congestión o en situaciones críticas sobre el tráfico comercial convencional.

En nuestro país, los operadores comerciales se niegan en rotundo aparándose en el principio anteriormente mencionado, pese a que este tipo de medidas ya se están aplicando en otros países europeos, como Francia y Bélgica, donde la evolución de sus servicios de comunicaciones PPDR de banda estrecha se apoyará preferentemente en las redes de uso comercial. Concretamente, en Francia ha desarrollado la Ley n° 2023-22 du 24 janvier 2023 d'orientation et de programmation du ministère de l'intérieur [28] y en Bélgica la Arrêté royal concernant l'accès radioélectrique dans la bande de fréquences 700 MHz de 28 de noviembre 2021[29].

Fuera del continente europeo, Estados Unidos cuenta con la *PUBLIC LAW 112-96—FEB. 22, 2012 To provide incentives for the creation of jobs, and for other purposes* [30]. Resulta de interés profundizar un poco más en la situación de este país como claro ejemplo de concienciación de la importancia de los sistemas PPDR [30]:

- En su Título VI *Public Safety Communications and Electromagnetic Spectrum Auctions*, se establece la *FirstNet Authority*²⁰ y se definen los términos de funcionamiento de la red nacional de seguridad pública.
- Sec. 6101: *Reallocation of D Block to Public Safety*. Se reserva el bloque D (2x5MHz) de la banda de 700 MHz para la red de comunicaciones de seguridad pública.
- Sec. 6102: *Flexible Use of Narrowband Spectrum*: Se crea la posibilidad de un uso flexible del espectro destinado a comunicaciones de seguridad pública de banda estrecha para banda ancha. En base a esto, FirstNet logra disponer de 20 MHz de espectro (2x10 MHz).
- Sec. 6211: *Public Safety roaming and priority access*. Donde se indica que en caso necesidad de interés público, se podrán adoptar normas que mejoren la disponibilidad de las redes de seguridad pública mediante roaming hacia redes comerciales y prioridad de acceso sobre las mismas en una emergencia.

En enero de 2016, *FirstNet* publicó un concurso de contratación para proporcionar el servicio de comunicaciones de seguridad pública de banda ancha, adjudicándolo al operador comercial americano AT&T en marzo de 2017 bajo los siguientes acuerdos principales para los siguientes 25 años [31]:

- *FirstNet* cede el espectro (20 MHz) a AT&T y financia inicialmente con 6.500M\$, y éste debe desplegar y operar una red nacional de banda ancha para seguridad y emergencias durante más de 25 años.
- AT&T invertirá unos 40.000M\$ a lo largo de la vida del acuerdo para desplegar, operar y mantener la red, a la vez que se garantiza incluir las necesidades de seguridad pública.
- Adicionalmente, AT&T conectará a los usuarios de FirstNet a la red comercial de comunicaciones de AT&T.
- AT&T puede emplear el espectro cedido por *FirstNet* para propósito comercial cuando no esté siendo usado por cuerpos de seguridad y emergencias. El operador priorizará el servicio a dichos cuerpos frente al uso comercial.

En base a todo lo anterior, se podría desarrollar a nuestro nivel nacional la normativa que permita obligar a los operadores a proporcionar la priorización, gestión de la congestión de red e itinerancia que requieran las comunicaciones críticas en el uso de las redes comerciales de comunicaciones móviles de banda ancha.

Los requisitos que se deberían incluir en una nueva normativa nacional para facilitar las comunicaciones electrónicas procedentes de servicios de seguridad pública y emergencias sobre redes comerciales serían:

²⁰ Agencia del gobierno federal de los Estados Unidos encargada de gestionar y supervisar la red de comunicaciones de banda ancha dedicada para los servicios de emergencia, llamada FirstNet (First Responder Network Authority).

- Los operadores titulares de autorizaciones de uso de frecuencias para establecer y operar una red radioeléctrica abierta al público deben garantizar la continuidad y permanencia de las comunicaciones móviles críticas de muy alta velocidad destinadas a los servicios de seguridad nacional, de la defensa nacional, de la seguridad pública, seguridad vial o de los servicios que afecten a la seguridad de las personas o a la protección civil entre los servicios del Estado, las autoridades locales o sus grupos, los servicios de bomberos y salvamento, los servicios de asistencia médica de emergencia y cualquier otro organismo público o privado responsable de una misión de servicio público en los campos de seguridad y emergencias.
- Los operadores titulares de autorizaciones de uso de frecuencias para el establecimiento y explotación de una red radioeléctrica abierta al público deberán conceder solicitudes de itinerancia, en sus redes, al operador de la red de comunicaciones electrónicas de los servicios de seguridad y emergencias
- Se deberán establecer unas condiciones técnicas y tarifarias en la prestación del servicio de itinerancia.
- En caso de congestión, para garantizar el enrutamiento de las comunicaciones móviles críticas de muy alta velocidad, los operadores seleccionados a satisfacer las necesidades del operador de la red de comunicaciones electrónicas de la servicios de seguridad y emergencias concederán las solicitudes de acceso prioritario de estos últimos a las redes interconectadas abiertas al público en función de requisitos de seguridad pública, de conformidad con el Reglamento (UE) 2015/2120 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre de 2015, por el que se establecen medidas en relación con el acceso a una internet abierta y se modifica la Directiva 2002/22/CE relativa al servicio universal y los derechos de los usuarios en relación con las redes y los servicios de comunicaciones electrónicas y el Reglamento (UE) n° 531/2012 relativo a la itinerancia en las redes públicas de comunicaciones móviles en la Unión.

3.4.3 El Insuficiente Espectro Radioeléctrico para Sistemas PPDR

Al considerar la evolución del sistema actual hacia una red con capacidades de banda ancha, resulta complicado determinar con precisión la cantidad de espectro necesario para la transmisión de datos. Esto se debe a que dicha necesidad varía en función de las aplicaciones empleadas durante situaciones de emergencia, el número de usuarios desplegados en el terreno y la frecuencia con la que deben actualizarse los datos. Sin embargo, varios estudios coinciden en que para cumplir con estos requerimientos sería necesario reservar, al menos, 10+10 MHz de espectro [10], [32], [33].

A pesar de estos requerimientos mínimos de espectro, la situación en España es bien distinta. La primera referencia en nuestro país relativa a la reserva espectro radioeléctrico se realizó en 2015. El Cuadro Nacional de Atribuciones de Frecuencias (CNAF), del aquel momento, contemplaba una reserva 5+5 MHz conforme a la nota UN-31 para el despliegue de redes de seguridad pública y emergencias de banda ancha con la limitación de no poder concederse a ningún estamento hasta el año 2018 [34]. A comienzos de 2019, se otorgó al Ministerio del Interior el uso del mencionado espectro radioeléctrico, con el fin de desplegar una red de emergencias de ámbito nacional²¹ con capacidades de banda ancha.

Además de lo mencionado, en 2017 el Parlamento Europeo dio luz verde al plan para armonizar la banda de 700 MHz, con el objetivo de que los servicios inalámbricos de banda ancha en la Unión Europea estuvieran disponibles en 2020 siendo necesario reservar espectro radioeléctrico para sistemas BB-PPDR.

²¹ Esta concesión obligaba al Ministerio del Interior a llegar a acuerdos de colaboración y/o compartición en aquellas CCAA donde pudieran existir redes PPDR pertenecientes a FFCCSS de ámbito autonómico o local.

En España, tras la finalización del segundo dividendo digital el 30 de junio de 2020, el Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital publicó un nuevo CNAF asignando una parte de la banda de 700 MHz que quedó liberada a servicios de seguridad pública emergencias de banda ancha conforme a los siguientes criterios [35]:

- En la Banda B31: 2 x 5,5 MHz (452-457,500 MHz/462-467,500 MHz) de uso preferente por el sistema de ámbito nacional pero con las mismas condiciones de compartición y/o colaboración establecidas en [34].
- En la Banda B68: 2 x 5 MHz (698-703 MHz/753-758 MHz) para cubrir necesidades BB-PPDR en el ámbito autonómico o local.
- En la Banda B28: 2 x 3 MHz (733-736 MHz/788-791 MHz) para necesidades exclusivamente de ámbito nacional.

El CNAF vigente en la actualidad [36], competencia del Ministerio de Transformación Digital y Función Pública, mantiene vigentes las asignaciones y condiciones para sistemas BB-PPDR, sin embargo, a juicio del alumno, se sobreprotege el servicio de la televisión digital terrestre²² (TDT) dado que los titulares del uso de las frecuencias en B28 y B68 deberán realizar las correcciones técnicas necesarias para eliminar las interferencias que puedan afectar la recepción del servicio de televisión, asumiendo, en su caso, los costes de las modificaciones en las instalaciones receptoras afectadas o de las instalaciones alternativas que sean necesarias para garantizar la continuidad del servicio de radiodifusión de televisión [36].

Igualmente, no se concederán títulos habilitantes de derechos de uso de este espectro, salvo para pruebas experimentales, hasta que se lleven a cabo las pruebas necesarias para evaluar las posibles interferencias y se adopte un plan de acciones para su eliminación [36].

Es fundamental analizar las características de estas bandas y las oportunidades que brindan para servicios de misión crítica, así como el ecosistema actual de terminales e infraestructura necesarios para operar en ellas, con el fin de evaluar su utilización.

En un primer análisis, considerando únicamente las capacidades de las frecuencias asignadas a PPDR:

- La banda B31 en 450 MHz presenta propiedades radioeléctricas considerablemente más ventajosas, ya que facilita una mayor penetración en los edificios y ofrece mejores niveles de cobertura.
- Las bandas de 700 MHz para PPDR tienen un alcance menor, lo que conlleva la necesidad de instalar un mayor número de emplazamientos para cubrir la misma área. Este incremento en la cantidad de infraestructuras a implementar, y a su vez, sus mayores costes obligan a un estudio riguroso para determinar la viabilidad de proporcionar una cobertura nacional en este rango de frecuencias.

En cualquier caso, la capacidad disponible para un sistema BB-PPDR de ámbito nacional, oscilando entre 3 y 8 MHz, no es suficiente ([10], [32], [33]), lo que hace necesario emplear técnicas de multidifusión o *multicast* para desvincular de alguna manera las comunicaciones del número de usuarios simultáneos.

3.4.3.1 Estimación empírica del espectro necesario para una red BB-PPDR en España

Para poder argumentar debidamente ante el regulador competente en nuestro país las sucesivas necesidades de espectro remitidas desde la SES para la evolución de la red SIRDEE, en el anterior y en el actual contrato de la misma se licitó un entorno controlado de laboratorio para que en colaboración con el proveedor de servicio se pudiera hacer todas las baterías de pruebas necesarias y comprobar los avances del I+D+i del sector PPDR [17], [37].

²² Los verdaderos motivos se explicarán más adelante en este capítulo.

En este entorno se recreó una red dedicada LTE compuesta de una estación base, un *core* dedicado y 26 terminales registrados para estimar con mayor precisión las necesidades reales de ancho de banda en una red de emergencias, extrapolando los resultados en función del nivel de señal y el número de terminales inscritos en la celda.

En redes móviles se utilizan códec *Adaptive Multi-Rate Wideband* (AMR-WB) para mejorar la calidad de las llamadas de voz, proporcionando una experiencia más clara y natural al usuario, gracias a su capacidad para cubrir un mayor rango de frecuencias que los códecs tradicionales. A pesar de ofrecer alta calidad, logra comprimir eficientemente la voz, lo que permite un uso óptimo del ancho de banda. Se adapta a diferentes condiciones de red ajustando la tasa de bits de manera dinámica, asegurando la continuidad de la llamada incluso con variaciones en la calidad de la red [38], [39].

Durante las pruebas se evaluaron diferentes escenarios considerando el tipo de transmisión (voz o video), la codificación utilizada y el ancho de banda disponible (1.4, 3 y 5 MHz).

Las condiciones concretas del entorno emulado fueron las siguientes:

- Capa radio: Estación base Nokia:
 - 40 W de potencia de emisión.
 - Carga en salida equipo Radio para simular condiciones de borde de Celda.
 - Antena en configuración *Single Input Single Output*²³ (SISO).
- Capa Core: Core dedicado del fabricante Nokia.
- Capa de Servicios: Servidor MCPPTx ed Nokia:
 - 4 *Talk Groups* (TG) definidos (Total, Alfa, Beta y Gamma).
 - Puesto de Despacho.
 - MDM.
 - Grabador de comunicaciones.
- Terminales: RuddGear.
 - 26 Terminales (1 terminal como transmisor, 1 terminal como medidor de campo, resto como receptores).
 - Aplicación de Emergencias de Nokia *Push To Talk* (PTT) + *Push To Video* (PTV) + Mensajería.
 - 26 SIMs LTE 450 privada, simulando operador ficticio.
- Condiciones simuladas:
 - 3 Anchos de banda: 5+5MHz, 3+3MHz, 1.4+1.4 MHz.
 - Banda de trabajo B31.
 - Simulación de tráfico en 3 escenarios (-80dBm, -94dBm, -105dBm, medidos en antena receptora terminal²⁴) para cada ancho de banda anterior.
 - La atenuación de señal para esos 3 escenarios se consigue mediante reubicación de antena emisora y reubicación de terminales receptores.
 - Cada batería de pruebas comienza con las condiciones menos complicadas (-80dBm) hasta alcanzar las más difíciles (-105dBm).
 - Por cada combinación de nivel de señal, Ancho de banda y tamaño de datos (voz/vídeo), se va eliminando terminal a terminal hasta que todo el grupo recibe una calidad de voz y vídeo perfecta.
 - Se anota como resultado de esa prueba el valor más restrictivo de número de terminales en el grupo que han recibido correctamente la comunicación.
- Fecha de ejecución: semanas 14 y 15 de 2021.
- Muestras: más de 3500 medidas.

²³ esquema de comunicación donde se utiliza una única antena tanto para transmitir como para recibir señales. Es el tipo más básico de configuración en sistemas de comunicación inalámbrica.

²⁴ Cada nivel pretende simular las condiciones de proximidad, distancia media y borde de celda respectivamente.

En lo que respecta a las comunicaciones de voz, utilizando un códec AMR-WB a 20 Kbps, los resultados se muestran en la tabla 3-4, el valor recuadrado indica el número de terminales que reciben correctamente la transmisión de manera simultánea.

Ancho Banda	Nivel Señal	Voice Group Call
1.4 MHZ		Codec AMR-WB (20 Kbps)
	-80 dbm	24+
	-94 dbm	24+
	-105 dbm	20
3 MHZ		Codec AMR-WB (20 Kbps)
	-80 dbm	24+
	-94 dbm	24+
	-105 dbm	24+
5 MHZ		Codec AMR-WB (20 Kbps)
	-80 dbm	24+
	-94 dbm	24+
	-105 dbm	24+

Tabla 3-4 Pruebas de PPT con diferentes anchos de banda (elaborada a partir de [17]).

Conforme a los resultados de la tabla anterior, se pudo verificar que con un ancho de banda superior a 3 MHz no se presentan inconvenientes para las comunicaciones grupales de los 25 terminales. No obstante, cuando el ancho de banda se reduce a 1.4 MHz y los terminales se encuentran en el borde de la cobertura de la celda, la capacidad se limita a un máximo de 20 terminales que podrían recibir la transmisión.

Para las pruebas de transmisión de video se llevaron a cabo pruebas de transmisión con velocidades, de 128 Kbps, 256 Kbps, 512 Kbps y 1 Mbps. En cuanto a la calidad de imagen, las transmisiones a 1 Mbps y 512 Kbps ofrecieron una resolución adecuada para distinguir objetos pequeños y reconocer personas incluso en movimiento. Sin embargo, a 128 Kbps, solo es posible identificar figuras estáticas y de tamaño medio o grande.

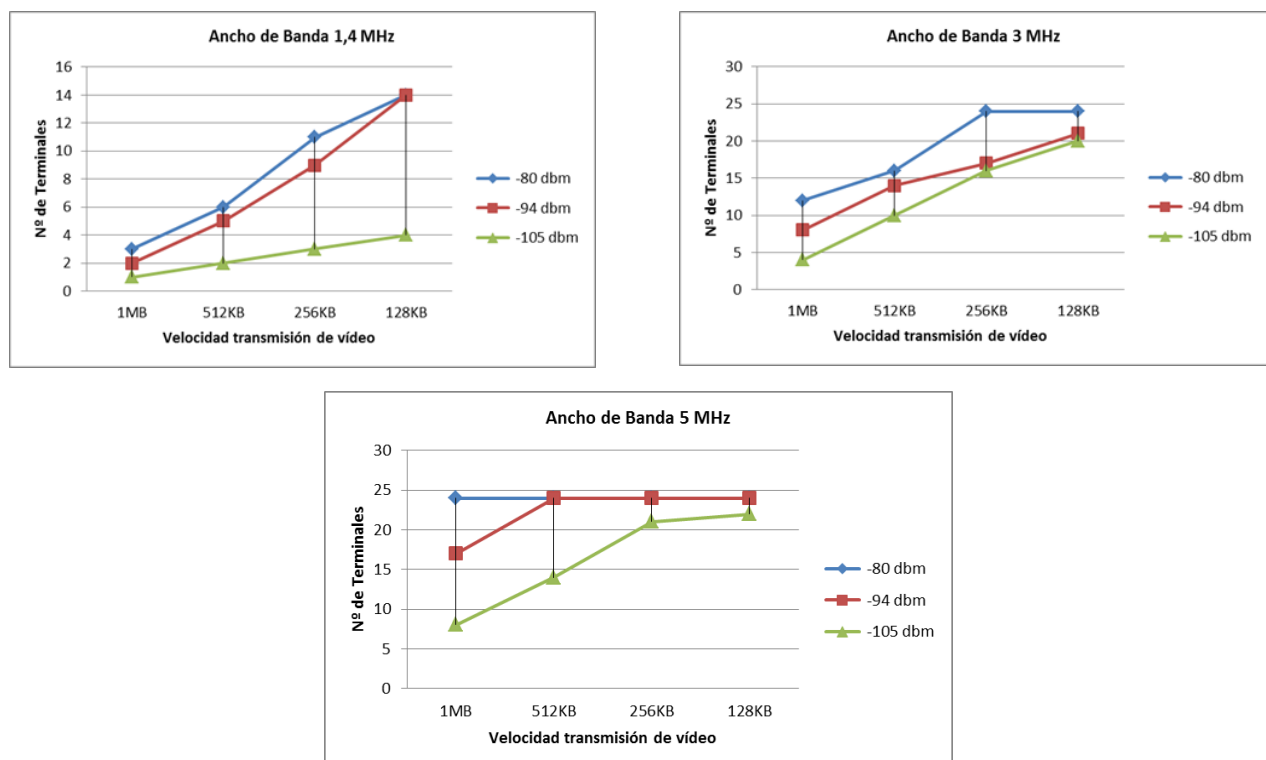


Figura 3-6 Pruebas de PTV con diferentes BWs (elaboradas a partir de [17]).

Es importante tener en cuenta que estos resultados se lograron en un entorno controlado, con bajo nivel de ruido, sin interferencias, sin desvanecimientos por multitrayecto (*fading*) y con un número limitado de terminales conectados a la celda (25). Por lo tanto, en pruebas reales de campo, los resultados que cabrían esperar serían en el mejor de los casos similares, aunque probablemente peores.

Adicionalmente, se ha llevado a cabo una estimación teórica de la capacidad que una red LTE puede ofrecer. En esta simulación se consideró cinco escenarios distintos, abarcando desde una carga completa en el borde de la celda hasta una carga total en la zona media de la misma con las siguientes consideraciones:

- Empleo de un códec de voz AMR-WB a 20 Kbps con *payload* incluido.
- Aunque la capacidad es independiente de la frecuencia usada (450 o 700 MHz), los efectos derivados del *fading* multitrayecto, hacen que el rendimiento real se vea afectado.
- Se ha considerado un *overhead* de señalización radio del 16% y de señalización canal tráfico del 20%.

Los valores presentados en la tabla 3-5 reflejan el número teórico de terminales que pueden estar en conversación simultánea (*downlink*), teniendo en cuenta los condicionantes anteriores.

Escenario1	% Trafico	Servicio Voz (Por Calidad Señal)		
		Ancho Banda Canal (MHz)	5	10
	100%	QPSK	203	408
	0%	16 QAM	0	0
	0%	64 QAM	0	0
		TOTAL	203	408
Escenario2		Servicio Voz (Por Calidad Señal)		
		Ancho Banda Canal (MHz)	5	10
	60%	QPSK	120	241
	30%	16 QAM	122	245
	10%	64 QAM	61	122
		TOTAL	302	608
Escenario3		Servicio Voz (Por Calidad Señal)		
		Ancho Banda Canal (MHz)	5	10
	50%	QPSK	101	204
	50%	16 QAM	205	412
	0%	64 QAM	0	0
		TOTAL	306	616
Escenario4		Servicio Voz (Por Calidad Señal)		
		Ancho Banda Canal (MHz)	5	10
	30%	QPSK	61	122
	60%	16 QAM	243	490
	0%	64 QAM	61	122
		TOTAL	365	734
Escenario5		Servicio Voz (Por Calidad Señal)		
		Ancho Banda Canal (MHz)	5	10
	0%	QPSK	0	0
	100%	16 QAM	405	817
	0%	64 QAM	0	0
		TOTAL	405	817

Tabla 3-5 Capacidad teórica del número de terminales en conversación simultánea en una red LTE (elaborada a partir de [17]).

Para establecer una comparación con las capacidades del sistema actual, a continuación se presentan datos reales de inscripción de terminales en la red SIRDEE. La tabla 3-6 corresponde a dos

estaciones base de Barcelona durante los días 1 y 2 de octubre de 2017, coincidiendo con el operativo policial extraordinario relacionado con la declaración unilateral de independencia (DUI) de la Comunidad Autónoma de Cataluña.

		Barcelona/SANT PEDRO MARTIR	Barcelona/COLLSEROLLA II
01/10/2017	0:00	207	421
	4:00	158	352
	8:00	361	493
	12:00	350	453
	16:00	403	514
	20:00	544	555
02/10/2017	0:00	557	467
	4:00	509	486
	8:00	432	464
	12:00	172	222
	16:00	229	254
	20:00	219	209

Tabla 3-6 Inscripción de terminales en la red SIRDEE (Barcelona) durante el dispositivo policial extraordinario de la DUI en la CA. Cataluña (elaborada a partir de [17]).

La tabla 3-7 recoge los datos de inscripción de terminales en dos estaciones base de Madrid central durante los días 24 y 25 de abril de 2021, correspondientes al servicio policial ordinario de seguridad ciudadana de la Policía Nacional.

		Madrid/ Gran Vía	Madrid/ Velázquez
24/01/2021	12:00	376	195
	16:00	420	211
	20:00	400	268
25/01/2021	0:00	259	220
	4:00	227	184
	8:00	269	168
	12:00	318	210

Tabla 3-7 Inscripción de terminales en la red SIRDEE durante un día de operación en Madrid centro (elaborada a partir de [17]).

A partir de los datos expuestos, se puede concluir que, para implementar una red LTE destinada a seguridad y emergencias en áreas urbanas con alta densidad de tráfico, sería necesario contar con al menos 10 MHz de ancho de banda. Esto permitiría asegurar las comunicaciones de voz con un nivel de disponibilidad comparable al que ofrece la red *trunking* actual, sin tener en cuenta servicios adicionales. Esta recomendación está en línea con las sugerencias de los grupos de expertos mencionados previamente en este TFM [10], [32], [39].

3.4.3.2 Multicast: la magia en situaciones de recursos escasos

El espectro disponible en la actualidad (3+5 MHz) parece claramente insuficiente según los datos alcanzados en el laboratorio por la SGSICS y demás argumentos presentados hasta ahora en este TFM. Sin embargo, el uso de técnicas *multicast* puede ofrecer una solución, al menos de manera empírica en un entorno controlado de laboratorio, como se intentará demostrar en este apartado.



Figura 3-7 Transmisión *Broadcast* vs. *Unicast* (elaboradas a partir de [17]).

La funcionalidad *evolved Multimedia Broadcast Multicast Services* (eMBMS), también conocida como *LTE Broadcast*, permite que una red LTE distribuya el mismo contenido a múltiples usuarios de forma simultánea en modo *broadcast*. Esto optimiza el uso de los recursos, ya que evita que cada usuario solicite individualmente el acceso a la información en un modelo *on demand*, donde la transmisión se realiza en modo *unicast*. En este último caso, la red genera un flujo de información separado para cada usuario, incluso si todos están recibiendo el mismo contenido [40].

MBMS fue especificado por el 3GPP en la *release* 6 no siendo hasta la *release* 11 cuando acabó finalmente la definición de la versión mejorada (*evolved* MBMS) y permitió su implementación comercial [23], hecho que no se ha producido hasta la fecha.

La tecnología eMBMS presenta tres características clave que son especialmente relevantes para su funcionamiento [40]:

- No se generan interferencias entre las celdas; al contrario, la transmisión en todas las celdas dentro de un área de red de frecuencia única (SFN) está perfectamente sincronizada.
- No se produce congestión, ya que se envía una única copia del contenido a todos los usuarios del servicio simultáneamente.
- La modulación es fija para toda la zona de cobertura, sin ser adaptativa. Esto es independiente de la calidad del enlace de radio.

Ancho Banda	Nivel Señal	Video Group Call			
1.4 MHz		1MB	512KB	256KB	128KB
	-80 dbm	7	13	17	20
	-94 dbm	6	10	13	18
	-105 dbm	4	6	10	13
3 MHz		1MB	512KB	256KB	128KB
	-80 dbm	16	24+	24+	24+
	-94 dbm	12	21	24+	24+
	-105 dbm	7	16	20	24+
5 MHz		1MB	512KB	256KB	128KB
	-80 dbm	24+	24+	24+	24+
	-94 dbm	24+	24+	24+	24+
	-105 dbm	21	24+	24+	24+

Tabla 3-8 Pruebas de MCPTV con diferentes BWs e implementando eMBMS (elaboradas a partir de [37]).

Repitiendo la misma metodología de los ensayos empíricos anteriores (ya descrita en el apartado 3.4.3.1), y utilizando ahora técnicas de multidifusión en el laboratorio para transmisión PTV se obtienen los resultados de la tabla 3-8.

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que el uso de la tecnología eMBMS mejora significativamente los resultados, aunque no en casos de muy poco ancho de banda (pruebas con BW= 1.4 MHz). No obstante, representa en la actualidad, la única alternativa viable para optimizar el limitado espectro radioeléctrico asignado en España para las redes de seguridad pública y emergencia.

3.4.4 Los Intereses de los Usuarios Finales vs. las Empresas del Sector

Como se ha mencionado a lo largo de este TFM, tecnologías como LTE y 5G no han sido diseñadas originalmente para cubrir las necesidades específicas de las comunicaciones PPDR [38]. Ha sido necesario introducir actualizaciones, a través de diferentes *releases* (ver apartado 3.2), que aunque están detalladas de manera teórica en los estándares, requieren de una implementación práctica por parte de los fabricantes en los diferentes niveles de la arquitectura; RAN, Core, aplicaciones y dispositivos radio para su uso efectivo.

En lo que respecta a las comunicaciones críticas, como ya ha sido comentado, las funcionalidades más importante se incluyen en las *releases* 12, 13, 14 y 15, con el fin de cubrir plenamente los requisitos más importante de las comunicaciones PPDR. Esto permitirá integrar la voz crítica de manera efectiva, en un entorno comparable al de las tecnologías tradicionales como TETRA y TETRAPOL. Los requerimientos específicos son los siguientes [41]:

- Implementación de un sistema de comunicación en grupo (*Group Communications System Enablers*, GSCE) que permita la transmisión simultánea de flujos de voz y video hacia varios dispositivos móviles utilizando un único canal en el enlace descendente.
- Servicios de Proximidad (ProSe) o modo directo, que permiten la comunicación directa entre dispositivos sin la necesidad de intervención de la infraestructura de red.
- Modos degradados (*Isolated E-UTRAN Operations*, IOPS), que permiten mantener las comunicaciones dentro del área de cobertura de una estación base, incluso cuando el enlace entre esta y la red de transmisión se encuentra interrumpido.
- *Mission Critical Push To x* (MCPTx) posibilitando las comunicaciones de grupo y las llamadas individuales de voz, video y datos.

El reducido tamaño del ecosistema de usuarios de redes PPDR, en contraste con los miles de millones de usuarios de redes comerciales convencionales, lleva a que los fabricantes prioricen su inversión en I+D+i en el segmento comercial, dejando en segundo plano las comunicaciones de emergencia. Como resultado, las actualizaciones mencionadas anteriormente y la implementación de las funcionalidades ya referidas están experimentando importantes retrasos, lo que pone en duda la viabilidad de los proyectos de evolución, no solo en España, sino a nivel global.

En cuanto al proyecto de evolución del sistema español promovido por la SES, y dado el espectro radioeléctrico disponible (véase apartado 3.4.3), cualquier solución debe incluir obligatoriamente la implementación de técnicas de multidifusión, conocidas comercialmente como eMBMS y que no se implementan en las redes comerciales de la actualidad. Dan respaldando lo ya argumentado, a fecha de diciembre de 2024, hechos como:

- A nivel de RAN y Core de red, únicamente los fabricantes Ericsson y Nokia tienen implementados en una manera medianamente estable el eMBMS.
- A nivel de capa de servicios tan solo Airbus D&S cuenta con servidor MCX que lo implemente.
- A nivel de terminales radio la dificultad de implementar eMBMS es si cabe mayor, ya que además de las adaptaciones del *firmware* del terminal, es necesario que los *chipsets* de los mismos están habilitados. Qualcomm es el único fabricante de *chipsets* con soporte para

eMBMS que deriva en *royalties* a los fabricantes de terminales. Crosscall, Rugged, Zebra y Motorola son los únicos fabricantes que presentan modelos con eMBMS en sus respectivos portafolios.

Otras reticencias de los fabricantes del sector, guardan relación con la manera de utilizar de una manera eficiente los 5+3 MHz disponibles en el contexto ya descrito y conseguir *carrier aggregation* en banda B31 y B28 respectivamente ya que esta forma de agregación se desvía de las canalizaciones estándar y los desarrollos han de ser *ad hoc* imposibilitando economías de escala.

En el ámbito de una red de cobertura nacional, cualquier evolución potencial debe realizarse de manera progresiva, lo que requiere garantizar la interoperabilidad entre el sistema de banda estrecha actual y el nuevo. Este es un aspecto crucial, ya que, como se explicó en el capítulo 2, SIRDEE está basado en un sistema propietario. Desarrollar una pasarela de comunicaciones que integre completamente las funcionalidades de ambos sistemas es difícilmente viable, dado que contradice los intereses del proveedor de la tecnología TETRAPOL (Airbus D&S), perpetuando así la dependencia del Ministerio del Interior.

Otro factor determinante es el modelo de despliegue. Como se ha mencionado, los costes asociados a la evolución de una red de emergencias de la envergadura de SIRDEE hacen que una arquitectura de red híbrida sea la opción más viable. Para que este modelo funcione de manera eficiente, es fundamental que el traspaso entre la red privada y la comercial (conocido como *data switch*) se realice de forma ágil en ambos sentidos, garantizando que los requisitos de calidad de servicio de la infraestructura dedicada se mantengan en la red comercial teniendo en cuenta siempre el condicionante de ausencia de QPP en la parte comercial.

3.4.5 La Tecnología 5G: Lo que pudo ser y por el momento No es

En el nivel de desarrollo en el que se encuentra el presente TFM y teniendo en cuenta, que pese a que sin concretar nada todavía, se deja entrever que la tecnología elegida para una potencial evolución del sistema de banda estrecha actual es LTE cabe preguntarse:

- ¿No es ya LTE una tecnología *legacy*?
- ¿Qué hay del 5G?

La *release* 15 de 3GPP se definió y congeló en junio de 2018. Esta versión fue la primera especificación de 5G y marcó el inicio formal de la estandarización de la tecnología 5G NR (*New Radio*) [23].

Sin entrar en los aspectos más técnicos de esta tecnología, en el ámbito de las comunicaciones PPDR, uno de los avances más destacados en 5G es el concepto de *network slicing*, que permite configurar varias redes virtuales sobre una misma infraestructura física. En el ámbito de las comunicaciones de misión crítica, la implementación de estas particiones de extremo a extremo permitiría utilizar una red pública 5G para establecer sistemas de comunicación altamente robustos, seguros y fiables durante situaciones de emergencia [42]. Definir un *slice* específico para las comunicaciones PPDR en una red 5G comercial permitiría asegurar la disponibilidad de los recursos de la red incluso en situaciones de congestión²⁵.

Otro gran avance que sería de gran utilidad es la implementación de *sidelink device-to-device*, diseñado para permitir la comunicación directa entre dispositivos sin depender de la conectividad proporcionada por la infraestructura celular. *Sidelink* es capaz de operar en distintas configuraciones de espectro, incluyendo espectro dedicado, licenciado en banda o sin licencia, lo que ofrece una gran flexibilidad para su implementación en diversos escenarios [43]. Esta funcionalidad parece ser la solución a la implementación del modo directo (DMO) tan demandado por los usuarios finales de

²⁵ Su viabilidad técnica no implica la económica exigida por un operador comercial.

comunicaciones PPDR y como ya ha sido comentado fue definido ya en las *releases* 12 y 13 hace ya una década [23].

En la *release* 17 se ha finalizado la definición, incorporando capacidades mejoradas de sidelink que permiten una asignación de recursos más eficiente, un ahorro de energía optimizado y una extensión de la cobertura. En la evolución hacia 5G+ y versiones posteriores, el desarrollo de sidelink busca optimizar el rendimiento y la eficiencia, permitiendo nuevos casos de uso y acceso a espectro sin licencia. Un ejemplo es la *release* 18, que está diseñada para ofrecer mayores velocidades de datos mediante la agregación de portadoras y capacidades mejoradas de retransmisión [43].

Una vez descritas las aportaciones más importantes que 5G podría al ámbito de las comunicaciones críticas, sólo quedaría analizar como cuadra ésta con las condiciones tan particulares de espectro radioeléctrico ya descritas (apartado 3.4.3) y siendo consciente de la ausencia de QPP en las redes comerciales españolas.

Las redes 5G permiten tamaños de canal de 5 a 100 MHz (en múltiplos de 5 MHz) para frecuencias de trabajo por debajo de 6 GHz [44]. Esto tiene como primera consecuencia la imposibilidad de utilizar la asignación española en banda B28 de 3MHz en el caso de utilizar esta tecnología como la sustituta de TETRAPOL. A pesar de este impedimento parecer ser un mal menor, dado que se dispone de otra asignación de 5 MHz en banda B31.

Si se tiene en cuenta el hecho que la B31 vs. B28 tiene teóricamente unas mejores condiciones de propagación por estar ubicadas a frecuencias más bajas [11] y las potenciales mejoras de 5G para comunicaciones PPDR descritas en este apartado, cabe cierto halo de esperanza para la elección de esta tecnología para sustituir al sistema actual de banda estrecha, al menos en pruebas de laboratorio.

Aprovechando los estudios en campo real previos a los primeros despliegues de redes 5G para uso comercial en nuestro país realizados por el Ministerio de Industria Energía y Turismo en el año 2021, se tuvo la oportunidad de probar la afectación mutua entre los servicios de Televisión Digital Terrestre (TDT), 5G y PPDR en las bandas de 450 y 700 MHz.

El propósito de estas pruebas era analizar las posibles interferencias que puedan surgir entre las emisiones de TDT y otros servicios en las bandas adyacentes, además de determinar las medidas de mitigación necesarias para asegurar la compatibilidad radioeléctrica entre todos los servicios ofrecidos. Se realizó la evaluación de las posibles interferencias en los diferentes tipos de instalaciones de recepción de TDT, tanto en áreas urbanas como rurales, con el fin de que los resultados obtenidos puedan extrapolarse y aplicarse a nivel nacional [45].

En la elección del teatro de operaciones se tomó como referencia la información disponible del despliegue LTE en la banda 800MHz buscando además los siguientes condicionantes [45]:

- Localidades donde las emisiones de la señal TDT se ubiquen en los canales más cercanos a los límites superior e inferior de la banda [470-694MHz], buscando interferencias con sistemas PPDR en banda B31.
- En zonas con posibles interferencias de las redes inalámbricas 5G y los servicios PPDR sobre la TDT, debe existir una muestra representativa de edificios con distintos tipos de instalaciones de recepción TDT (antena individual, amplificador de banda ancha, centralita programable, amplificadores monocanal).
- Posibilidad de evaluar las medidas de mitigación en un entorno acotado y controlado.

Tras una ventana de pruebas de semanas (en julio de 2021) se alcanzaron las siguientes conclusiones [45]:

- Todas las interferencias han sido causadas por la saturación de los componentes activos de la instalación, tanto en los amplificadores de banda ancha o centralitas programables, como en los amplificadores de mástil.

- Las instalaciones colectivas que contaban con amplificadores monocanal logran bloquear las interferencias de las redes 5G y PPDR sin necesidad de utilizar filtros adicionales.
- En todos los casos, las interferencias producidas por las estaciones 5G y PPDR se han solucionado con éxito mediante la implementación de filtros paso banda.
- El servicio PPDR 450 MHz produjo gran nivel de afectación por interferencias en el canal S41, adyacente al canal 21 de la TDT, ya que los filtros paso banda solo redujeron las interferencias en 10-15 dB en los hogares con amplificadores de banda ancha/centralitas programables como en los amplificadores de mástil.

Los resultados de este estudio trajo como principal consecuencia la modificación del CNAF del diciembre de 2021 y que ya ha sido comentada (apartado 3.4.3) [36].

Las interferencias concluidas en el estudio tienen bien distinta solución para las comunicaciones PPDR en función de su frecuencia (B28 y B31 respectivamente). Mientras que un despliegue en banda B28 podría seguir una estrategia de “tierra quemada” conforme al despliegue de redes 5G comerciales aprovechándose de las sinergias del ‘Plan Llega 700²⁶’, en el caso de querer utilizar los 5+5 MHz en banda B31 al no haber ningún servicio comercial adyacente le correspondería al Ministerio del Interior la responsabilidad de solventar los problemas de interferencias según se establece en el actual CNAF [36]. En una red de ámbito nacional es inviable tanto desde el punto de vista logístico como desde el financiero.

La situación actual (diciembre de 2024) es que mientras no se produzca el *refarming* o cese del servicio TDT, el Ministerio del Interior no puede utilizar los 5+5 MHz en la banda B31 siendo la única alternativa viable para el despliegue de red dedicada los 3+3 MHz de la banda B28. Esto imposibilita la elección de la tecnología 5G como una alternativa a la transición.

Llegados a este punto, la continuidad de este TFM está condicionada a seguir explorando la vía de la transición del sistema actual utilizando la tecnología LTE con 3+3 MHz en la banda B28 puesto que permite anchos de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 20 MHz [46].

3.5 Estrategias de Evolución en Diferentes Redes PPDR del Mundo

En este apartado se busca mostrar cómo distintos países están abordando el desafío de evolucionar sus sistemas actuales hacia aquellos con capacidades de banda ancha.

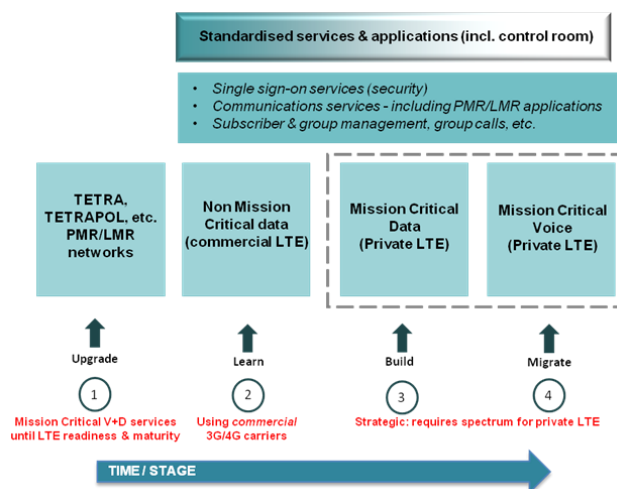


Figura 3-8 Etapas en la transición de las redes PPDR tradicionales hacia E-LTE (tomada de [47]).

²⁶ Este plan garantiza la compatibilidad entre las emisiones de la TDT y los nuevos servicios de 5G en la banda de 700 MHz, minimizando posibles interferencias ya que descarga en los operadores comerciales la responsabilidad de instalar soluciones de mitigación de interferencias en los hogares que lo denuncien.

En toda estrategia de migración hay que buscar un modelo combine un enfoque prudente, que buscando minimizar riesgos en un contexto donde no se pueden tolerar errores significativos, con una perspectiva de futuro de la evolución ineludible que deben seguir las redes PPDR actuales.

La figura 3-8 propone un *roadmap* alineado con esta visión.

Los países que están liderando este proceso de transición son los siguientes [48], [49].

3.5.1 Estados Unidos: Red FirstNet

Los aspectos más característicos del sistema BB-PPDR de los Estados Unidos son los siguientes:

- El espectro privado en 700 MHz destinado a PPDR (Banda 14, 20 MHz) ha sido cedido a un operador público (AT&T) por un periodo de 25 años. Este operador garantiza el servicio prioritario a los usuarios de PPDR, utilizando también el espectro en bandas comerciales adyacentes y comprometiéndose al despliegue de la infraestructura mediante la implementación de técnicas QPP.
- No hay un criterio aún de calidad mínima a cumplir o de cobertura total. Los usuarios públicos ante necesidades de espectro para PPDR son expulsados sin más para priorizar el tráfico PPDR.
- Aunque ya está operativa en cada vez más territorio, no se espera que la red esté completamente funcional antes de 2027, debido a los elevados costes asociados al despliegue.
- En la actualidad se encuentran en fase de I+D+i para implementar *None Terrestrial Networks* (NTN) mediante el empleo de satélites LEO.
- Pese a ser una referencia mundial en la comunidad PPDR, su servicio más utilizado es el MCPTD, no haciendo apenas uso de comunicaciones de voz lo cual es un hecho diferenciador respecto a lo que se persigue en nuestro país.

3.5.2 Reino Unido: Red ESN

El proyecto de evolución de la red de emergencias en el Reino Unido se caracteriza por los siguientes puntos:

- Uso de la red pública de un operador para servicios PPDR.
- Pese a no contar con el respaldo normativo, este proyecto exige que el operador asignado priorice el tráfico de comunicaciones críticas, por lo que inevitablemente se traducirá en un incremento notable de los costes.
- Inicialmente, la puesta en funcionamiento estaba programada para 2017, con el objetivo de reemplazar la red Airwave (basada en Tetra). Sin embargo, en 2018, el *Home Office* renegoció los contratos debido a la falta de disponibilidad tecnológica y los sobrecostes imprevistos (3.100 millones de libras adicionales, alcanzando un total de 9.300 millones de libras).
- Se baraja como nueva fecha de disponibilidad de la red, primer trimestre de 2025 [48].

3.5.3 Francia: Proyectos PCSTORM y RRF

La evolución francesa hacia sistemas con capacidades de banda ancha se está realizando mediante dos proyectos diferenciados los cuales tendrán que converger por una mera cuestión de optimización de costes.

3.5.3.1 PCSTORM

El Proyecto *Plateforme Commune des Services de Télécommunications Opérationnelles et de Réseaux Mobiles* (PCSTORM), impulsado por la Gendarmería Nacional de Francia, es una iniciativa para modernizar y unificar las comunicaciones operativas de las fuerzas de seguridad del país. Su objetivo principal es proporcionar una plataforma común que integre y coordine las comunicaciones

móviles y los servicios de telecomunicaciones operacionales para mejorar la eficiencia y la interoperabilidad entre las distintas agencias de seguridad y emergencia. Se caracteriza por:

- Se encuentra en fase de pruebas y evaluación.
- Está basada en una solución sobre red privada en 700MHz (2x5MHz B28) para la Gendarmería (buscando la evolución de su red Tetrapol RUBIS), con *backup* de red comercial.
- Su modo de operación actual es el despliegue de burbujas tácticas en determinados operativos.
- Debido a los altos costes de despliegue para la Gendarmería se está estudiando la manera de converger hacia el otro proyecto de evolución francés.

3.5.3.2 RRF

La *Réseau Radio du Futur* es el proyecto impulsado por el Ministerio del Interior francés con el objetivo de dotar de un sistema unificado y moderno a todas las agencias relacionadas con la seguridad pública y la gestión de emergencias del país. RRF presenta características muy diferenciadoras respecto la estrategia española debido principalmente a:

- Está basada en el uso de redes comerciales: sus cambios normativos permiten la implantación de técnicas de QPP sobre un operador comercial principal, existiendo un operador secundario como back up en caso de fallo o pérdida de cobertura.
- Pese a disponer de espectro dedicado en banda B28 no se contempla su uso salvo en casos muy determinados mediante el empleo de celdas tácticas desplegables.
- Los costes asociados son bastantes elevados, hasta el punto que la continuidad del proyecto está condicionada a tener del orden de 300.000 suscriptores. Esto ha obligado a abrir el servicio a otro tipo de agencias estatales, como el sistema ferrocarril nacional, perdiéndose la esencia estrictamente PPDR.
- Pese a sustentarse la solución en redes comerciales prácticamente ya desplegadas, el inicio de operación ha sufrido diversos retrasos; inicialmente el mundial de rugby de 2023, posteriormente los juegos olímpicos de 2024 (donde ha habido cierta actividad en pruebas mayoritariamente de envío de datos) y la nueva fecha apunta a comienzos de 2025 [48].

3.5.4 Alemania: Migración de la Red Digitalfunk BOS

El *Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben* es la Agencia Federal de Alemania encargada de gestionar la red nacional de comunicaciones digitales para organismos de seguridad y servicios de emergencia. Para la migración de su red Tetra *Digitalfunk BOS* tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Actualmente se encuentra en fase de pruebas utilizando una red pública LTE, aunque no se considera como una opción viable para reemplazar Tetra debido a la falta de garantía de servicio.
- Su solución final pasa por una red LTE privada que ofrezca calidad garantizada. Para ello debido al escaso espectro radioeléctrico disponible para PPDR, está liderando en Europa una iniciativa para conseguir 10+10 MHz en la banda de 450-694MHz mediante la reubicación de servicios de TDT. Esta iniciativa fue presentada en el *World Radio Conference 2023* celebrado en Dubái con resultados infructuosos por el momento.

3.5.5 Finlandia: Virve 2.0

Para comprender la estrategia de migración del gobierno finlandés, es importante tener en cuenta sus particularidades en términos de población y densidad demográfica.

- El operador comercial *Suomen Erillisverkot* ha elegido a Ericsson como proveedor de un *core* LTE para su servicio de comunicaciones críticas.
- Debido a los altos costes de despliegue en términos de densidad poblacional de una red nacional en este país, utiliza espectro público empleado por operadores comerciales en la banda de 700 MHz.
- La red combina un *core* privado con infraestructura de radio pública. Han finalizado con éxito los cambios regulatorios y normativos necesarios para ofrecer servicios diferenciados a la comunidad PPDR sobre redes comerciales públicas.
- El operador finlandés espera tener la red completamente operativa para el año 2025.

3.5.6 España: Evolución de la Red SIRDEE

Ya ha sido contextualizado con detalle en este TFM, SIRDEE es el sistema de comunicaciones PPDR de ámbito nacional. Sin embargo, en nuestro territorio existen otros sistemas de cobertura autonómica o local, RESCAT en Cataluña, COMDES en la Comunidad Valenciana, etc. No se tiene constancia de que los gestores de estos sistemas estén con pretensiones serias de migración en la actualidad, pudiendo estar de por medio razones como la falta de solvencia económica, o el escasísimo ecosistema de equipamiento disponible todavía en la banda B68²⁷.

Retomando el contexto nacional, en el marco del actual contrato de servicios para la red SIRDEE [37], está presente la prospectiva tecnológica en búsqueda de alternativas al sistema TETRAPOL. Por lo ya argumentado en este TFM y con las circunstancias tan particulares de nuestro país, una red híbrida es la solución de compromiso, a costes razonables, soluciones integradas que unan voz y datos de misión crítica con la transmisión de datos en banda ancha a través de redes públicas LTE de amplia cobertura.

La arquitectura de la solución propuesta está formada por cuatro capas compatibles e interoperables entre sí, conforme a la normativa 3GPP, *release* 13 o superior:

- Capa Radio (RAN)
- Capa de Conmutación
- Capa de Servicios
- Capa de Terminales

Cada una de las capas ha de estar basada en soluciones estándar conforme a las especificaciones 3GPP teniendo que ser perfectamente interoperables entre sí.

Los objetivos fundamentales que se buscan alcanzar son [37]:

- Realizar una comparación de la cobertura ofrecida por una red LTE en B31, B28 en relación con la red TETRAPOL.
- Evaluar el estado de madurez de las soluciones disponibles por parte de los fabricantes y su conformidad con el estándar establecido por el 3GPP.
- Garantizar la interoperabilidad entre distintas soluciones y fabricantes.
- Llevar a cabo pruebas de carga en diversos escenarios y con diferentes anchos de banda para evaluar la viabilidad de un despliegue masivo que reemplace la red *trunking* actual, de cara al futuro contrato de servicios con fecha de inicio 01/01/2027.

De acuerdo con el *roadmap* mostrado en la ilustración 3-8, actualmente y en el futuro próximo, continuamos en la fase 2 (uso de aplicaciones sobre redes comerciales 3G y 4G). Un ejemplo de

²⁷ Recuérdese que la banda B68 es la designada para el desarrollo de sistemas regionales y o locales [36].

iniciativas en esta etapa es el proyecto SIGO en movilidad²⁸ implementado por la Guardia Civil. A su vez España se encuentra en condiciones para empezar a afrontar el comienzo de la fase 3.

3.5.7 BroadEU: El Intento de Convergencia

El proyecto BroadEU.net es una iniciativa financiada por la Unión Europea cuyo propósito es desarrollar el Sistema de Comunicación Crítica de la UE (EUCCS). Este sistema está diseñado para mejorar las comunicaciones de los servicios de emergencia y seguridad pública en Europa, asegurando su operatividad eficiente sin importar la ubicación geográfica, especialmente en situaciones de crisis o desastres transfronterizos. A continuación, se describen los objetivos, fases del proyecto y la participación de España.

El objetivo principal del proyecto BroadEU.net es desarrollar un sistema de comunicaciones móviles críticas que facilite la operatividad sin interrupciones de los servicios de protección civil, fuerzas de seguridad y otras entidades en toda Europa, sin importar las fronteras. Este sistema garantizará una red segura, robusta y fiable, capaz de ofrecer servicios prioritarios como voz, vídeo y datos en situaciones de emergencia.

Las principales etapas e hitos del proyecto son [50]:

- BroadMap (2016-2017): Esta fase se centró en identificar las necesidades de los usuarios y establecer los requisitos tecnológicos iniciales.
- BroadWay (2018-2022): Durante esta etapa de precompra, se validó la viabilidad de las soluciones técnicas propuestas, si bien es verdad que las propuestas no incluían las especificidades requeridas en España en cuanto a eMBMS.
- BroadEU.net (2022-2026): Esta fase en curso se enfoca en realizar pruebas tecnológicas y procedimientos operativos para asegurar la interoperabilidad transfronteriza.

EUCCS establece el marco para la movilidad operativa en toda Europa. Este sistema promoverá, al menos teóricamente, la colaboración entre los servicios de emergencia de distintos países mediante una infraestructura común y estandarizada, lo que mejorará la coordinación durante crisis, desastres naturales y emergencias transfronterizas.

Aunque no cabe duda que la idea desde el punto de vista ‘romántico’ es muy interesante, la realidad es diferente; desde la interoperabilidad de sistemas de distintos países, con diferentes características técnicas hasta el roaming de agencias PPDR preservando prioridades, abre un inmenso campo de problemáticas en las que en la mayoría de los casos las de carácter técnico son las más fáciles de resolver siendo el principal escollo los aspectos legales.

España, junto con otros 15 Estados miembros de la UE y países del Espacio Schengen, participa activamente en el proyecto BroadEU.net, siendo el papel desempeñado el de observador puesto que las pruebas actuales en el contexto de BroadEU.net están enmarcadas en el uso de redes comerciales con tráfico *unicast* lo cual difiere completamente con las condiciones nacionales descritas a lo largo de este capítulo.

3.6 Conclusiones del Capítulo

En este capítulo 3, se han presentado argumentos que respaldan la idea de que LTE se perfila como el nuevo estándar para las comunicaciones en entornos PPDR, según múltiples estudios realizados por la industria, los operadores y los usuarios finales.

²⁸ Es una iniciativa que pretende que los agentes puedan acceder al Sistema Integral de Gestión Operativa (SIGO) desde dispositivos móviles en el terreno, lo que les permite consultar información relevante, registrar incidencias y coordinarse en tiempo real sin necesidad de regresar a las comisarías o dependencias físicas.

Este tipo específico de comunicaciones, requiere la integración de señales de voz con la capacidad de transmitir datos en banda ancha. Mientras que las tecnologías PMR tradicionales como TETRA y TETRAPOL son altamente eficaces en la gestión de voz, LTE ofrece una capacidad significativamente superior para la transmisión de datos a alta velocidad.

Aunque podría parecer que LTE reemplazará rápidamente a las tecnologías radio tradicionales, existen diversos factores que impactan en su evolución y adopción inmediata, tales como la necesidad de consenso y desarrollo de estándares que integren voz crítica en LTE, consideraciones regulatorias, y la problemática relacionada con la armonización y liberación de espectro suficiente para establecer redes de comunicación. Por lo tanto, la perspectiva de la Secretaría de Estado de Seguridad, a través de la Oficina del Programa SIRDEE, no es tan optimista, anticipando que el uso de la tecnología TETRAPOL en el país se prolongará, en el mejor de los casos, por al menos 10 años, y considerando una estimación más realista de 15 años adicionales hasta su completa sustitución.

Este retraso en las previsiones se atribuye a la falta de impulso suficiente por parte de las industrias del sector, y en el caso concreto de España, los significativos problemas de interferencias con el servicio de TDT que impiden utilizar la totalidad de los 5+3 MHz concedidos al Ministerio del Interior haciéndose mandatorio la implementación de eMBMS dificultando las economías de escala en el ecosistema de equipamiento PPDR.

4 RESULTADOS

4.1 Objetivos del Capítulo

Una vez fijados en el capítulo anterior, los elementos condicionantes no sólo desde la perspectiva tecnológica, sino también desde el prisma de los recursos económicos y los impedimentos existentes según el marco legislativo vigente, es el momento de desplegar entornos piloto con pruebas controladas para que, una vez validados los resultados obtenidos, puedan servir para verificar la hipótesis principal formulada al inicio de este trabajo es decir poder determinar si la transición hacia capacidades de banda ancha en el momento de la redacción de este TFM es una quimera, puede convertirse en realidad, o nos encontramos en una situación intermedia, llegando a la verificación parcial de las hipótesis planteadas.

Por tanto, se describirá inicialmente el proceso seguido para el despliegue de los entornos piloto, dando paso a la presentación de los resultados en la segunda parte del capítulo.

4.2 Pasos Preliminares

4.2.1 *La Elección de un Proveedor de Servicios*

Como ya ha sido argumentado en diversas ocasiones durante la redacción de este TFM, el hipotético sistema de evolución debe mantener la esencia del sistema SIRDEE *legacy*, es decir, debe continuar basado en un servicio. Por esta razón el primer paso es contar con un proveedor del mismo.

A su vez, la legislación vigente en materia de contratos del sector público exige una serie de principios, entre los que destacan los de transparencia y libre concurrencia. Para garantizar estos principios, la Oficina del Programa SIRDEE creyó conveniente preparar una solicitud de información, RFI (*Request for Information*), dirigida a los principales operadores de telecomunicaciones de nuestro país.

Esta RFI tenía como finalidad conocer la capacidad de la industria para proveer una solución tecnológica capaz de dotar a las FCSE de un servicio de radiocomunicaciones de banda ancha de misión crítica. Las conclusiones del análisis de toda la información recabada servirán de base para definir el futuro de la red SIRDEE [51]. La petición de información utilizada puede revisarse en el Anexo III.

Como resultado de esta consulta realizada, únicamente la empresa Telefónica Móviles de España participó y mostró su interés en participar en el proyecto.

4.2.2 La NO Elección de un Único Proveedor Tecnológico

Con el objeto de no volver a caer en errores pasados (la elección de una solución propietaria), además de evitar cualquier reparo por parte de la Abogacía del Estado en lo referente a la libre competencia, la SGSICS, decidió poner en marcha un proceso multifabricante donde las empresas interesadas pudieron optar a participar en:

- Capa Radio (Red de Acceso Radio, RAN).
- Capa Core de Red.
- Capa de Servicios (Aplicaciones MCPTx más la pasarela LTE-TETRAPOL).
- Capa de Terminales.
- Solución Completa.

De acuerdo a esta clasificación, se presentaron 5 empresas participando de la siguiente manera:

- AIRBUS: Capas de Servicios y Terminales (en UTE con la empresa Crosscall para los terminales radio).
- HUAWEI: Solución completa de red LTE.
- MOTOROLA. Capas de Servicios y Terminales.
- NOKIA: Solución completa de red LTE.

4.2.3 Verificación Tecnológica Preliminar

El despliegue de un entorno de pruebas de dimensiones próximas a la extensión de una provincia, implica una inversión importante de recursos de todo tipo (económicos, materiales, humanos, etc.) que no pueden hacerse de una manera arbitraria. Se hace necesario un proceso de validación preliminar al objeto de verificar si el estado del arte está lo suficientemente maduro como para satisfacer los requisitos que exige el despliegue de una red de comunicaciones de misión crítica.

Esta fase de evaluación se desarrolló durante el año 2022 y se establecieron 4 hitos que sirvieron de base para tratar de asegurar un resultado satisfactorio a la finalización de aquella, concretamente:

- 30 de abril de 2022: fecha máxima para considerar una solución dentro del proceso de evaluación. a partir de esta fecha no se tuvo en consideración ninguna propuesta para participar en la fase de evaluación.
- 17 de junio de 2022: fecha tope para el acopio de material por parte de las empresas y su disposición e instalación en el laboratorio de la OP SIRDEE.
- 31 de octubre de 2022: fecha en la que debían haberse iniciado las pruebas extremo a extremo. A partir de este momento el Ministerio del Interior podría determinar si una solución quedaba fuera del proceso de evaluación por no cumplir los requisitos mínimos.
- 31 de diciembre: fecha tope de evaluación y validación de las soluciones técnicas presentadas por las empresas.

La OP SIRDEE se reservaba el derecho, por razones de interés para el proyecto y en condiciones muy excepcionales y validadas por aquel, de prolongar alguno de estos plazos.

4.3 Requisitos Mandatorios para el Despliegue de los Entornos Piloto

Teniendo en cuenta los factores limitantes y otras particularidades de nuestro país descritos en el capítulo 3 de este TFM, se desarrollan los 5 requisitos básicos exigidos para que una solución tecnológica pueda ser considerada:

- Las únicas bandas asignadas a la Secretaría de Estado de Seguridad para el despliegue de redes móviles de banda ancha son la B31 (450 MHz) con 5+5 MHz y la B28 (700 MHz) con 3+3 MHz. Por los problemas de interferencias ya explicados en el capítulo anterior, las pruebas finalmente se acometerían en la banda B28.

- Debido a la limitada disponibilidad de espectro y a los requisitos específicos de las comunicaciones de grupo, resulta imprescindible emplear técnicas de optimización del uso espectral como eMBMS.
- Las soluciones implementadas deben estar alineadas con los estándares 3GPP a partir de la *release* 13, garantizando la interoperabilidad entre terminales, radio, núcleo de red y servicios, independientemente del fabricante.
- Es fundamental asegurar la compatibilidad entre la red LTE privada y las redes comerciales LTE.

Es reconfortante para el alumno que suscribe, poder constatar que mediante otros estudios basados en análisis multicriterio [52], se converge a requisitos similares a los anteriormente descritos y que son el resultado de aplicar un análisis exhaustivo conforme a las particularidades desarrolladas en el capítulo anterior.

4.4 Resultado de las Pruebas Preliminares

Para la verificación del cumplimiento de los requisitos por parte de las soluciones presentadas por las empresas participantes se dispuso de 2 entornos de pruebas:

- Maqueta en el laboratorio del Programa SIRDEE.
- Entorno real en la zona sur de Alicante donde las empresas que se presentaron a las capa radio y core tuvieron la oportunidad de desplegar varios nodos LTE (en adelante eNB).

A lo largo del año 2022 se realizaron pruebas demostrativas y de verificación, tanto en maqueta como en campo, de las prestaciones de las soluciones participantes. Siendo en diciembre del mencionado año las pruebas finales, cuyo resultado se resume en los subapartados siguientes.

En relación a la banda espectral, únicamente Ericsson y Nokia presentaron soluciones compatibles con las 2 bandas exigidas (B31 y B28), aunque finalmente el Programa SIRDEE determinó enfocar las soluciones únicamente a la banda B28, dadas las dificultades técnicas y administrativas para desplegar en el futuro sobre la B31 (ya explicadas en el Capítulo 3).

4.4.1 Airbus

CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS BÁSICOS	
Capas presentadas	SERVICIOS Y TERMINALES
Banda Espectral	B28
eMBMS	SI
Interoperabilidad con otros	ERICSSON y NOKIA
Pasarela LTE-TETRAPOL	SI (PRESCOM)
Red privada - pública	SI

Tabla 4-1 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Airbus.

La capa de servicios presentada por Airbus, denominada AGNET, se basa en el *software* de base *Team On Mission* desarrollado por la compañía francesa Streamwide. En la capa de terminales optó por el terminal Crosscall Core X5.

Su solución fue probada sobre infraestructura de Ericsson y Nokia con resultado dispar. Siendo la misma capa de servicios el comportamiento con la infraestructura de Nokia era más estable que con la de Ericsson.

Con esta última, la imagen en las comunicaciones de vídeo se congelaba con frecuencia usando eMBMS, además de requerir unas condiciones que daban síntomas de fragilidad en el establecimiento de comunicaciones eMBMS, ya que en los terminales receptores se requería descolgar las llamadas entrantes de acuerdo a una secuencia para que el sistema no entrara en un estado imprevisible.

La pasarela para interconectar la red LTE y Tetrapol fabricada por Prescom, mejoró sus prestaciones a lo largo del año de pruebas. El establecimiento de la primera comunicación requería unos 2 segundos. Además, como valor añadido, implementaba mecanismos *trunking* para asignación de puertos en ambos lados.

La transición de la red privada a la pública se consiguió con éxito, si bien una última actualización del *firmware* del terminal introdujo una pérdida de calidad en la transición de la red pública a la privada, quedándose el terminal “pinponeando” entre ambas redes sin proveer servicio.

La solución presentada por Airbus cumplió en términos generales toda la funcionalidad requerida, a excepción del Modo Directo. Para resolver este último requisito propusieron una conexión Bluetooth con el terminal Tetrapol TPH900, lo cual no se considera de utilidad puesto que se trata, precisamente, de migrar de dicha red a una tecnología de banda ancha, y además supondría portar dos terminales.

4.4.2 Ericsson

CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS BÁSICOS	
Capas presentadas	SOLUCIÓN COMPLETA DE RED
Banda Espectral	B28 y B31
eMBMS	SI
Interoperabilidad con otros	AIRBUS y MOTOROLA
Pasarela LTE-TETRAPOL	SI (AMPER)
Red privada - pública	SI

Tabla 4-2 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Ericsson.

Ericsson presentó una solución completa tanto para B31 (terminal RugGear RG760) como B28 (terminal Crosscall Core X5).

Para la capa de aplicación se presentó inicialmente un *software* de la compañía española Genaker que no terminó de funcionar correctamente, por lo que se optó por el *software Team On Mission* de Streamwide.

A pesar de disponer de buenos niveles de RSRP a más de 20 Km del eNB, las comunicaciones no eran fiables ya que su comportamiento en campo era inestable, principalmente cuando se empleaba eMBMS. Por otro lado, se requerían entre 20 y 30 segundos en las comunicaciones eMBMS para que los terminales pasaran de *unicast* a eMBMS. Además, el descuelgue de una llamada de forma simultánea por más de 30 terminales provocaba resultados imprevisibles en el sistema.

En cuanto a la pasarela LTE-Tetrapol (de la empresa Amper), no alcanzaba el grado de servicio necesario. Si bien el tiempo de establecimiento del enlace de las comunicaciones entre ambas redes se redujo desde el inicio de la fase de evaluación llegando a unos 2 segundos, no siendo producto fiable puesto que no siempre se establecía la comunicación entre ambas redes.

En relación a la interoperabilidad de la red privada con la red pública se logró mejorar los tiempos de traspaso, aunque dada la inestabilidad de la solución, el traspaso de pública a privada no estaba garantizado, quedándose a veces los terminales en estado de espera de conexión.

En general, la solución de Ericsson cumplía con toda la funcionalidad requerida, salvo el ProSe o Modo Directo. No obstante, en las pruebas preliminares del año 2022 no disponían de la estabilidad y fiabilidad suficientes para desplegar una red de misión crítica.

4.4.3 Huawei

CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS BÁSICOS	
Capas presentadas	SOLUCIÓN COMPLETA DE RED
Banda Espectral	B28
eMBMS	NO
Interoperabilidad con otros	NO
Pasarela LTE-TETRAPOL	NO
Red privada - pública	NO

Tabla 4-3 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Huawei.

Aunque Huawei no logró desplegar en tiempo ningún nodo, se realizaron pruebas de laboratorio para conocer el estado de su solución. A pesar de ello, la solución no cumplió con los requisitos mínimos, ya que no fue capaz de realizar comunicaciones eMBMS, ni de voz, ni de vídeo.

Dado el resultado de las pruebas de comunicaciones extremo a extremo, esta compañía decidió no continuar con el resto de verificaciones.

4.4.4 Motorola

CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS BÁSICOS	
Capas presentadas	SERVICIOS y TERMINALES
Banda Espectral	B28
eMBMS	NO
Interoperabilidad con otros	ERICSSON
Pasarela LTE-TETRAPOL	SI (AMPER)
Red privada - pública	SI

Tabla 4-4 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Motorola.

Para la capa de servicios se presentó el producto Motorola MCX y el terminal LEX 11 de fabricación propia que no tiene capacidad eMBMS de vídeo.

Para las pruebas, Motorola integró su solución con la infraestructura de Ericsson y la pasarela de Amper (LTE-Tetrapol).

Únicamente disponían de eMBMS para el servicio de voz. En las pruebas de campo, se verificó que las comunicaciones de voz no eran estables y las comunicaciones de vídeo en *unicast* no funcionaban correctamente. También se comprobó que su aplicación tuvo un comportamiento anómalo, tal vez por una mala configuración de su capa de servicios o por el uso de la infraestructura de Ericsson no certificando la completa compatibilidad entre capas.

Se comprobó que era posible realizar comunicaciones tanto en red privada con red pública pero el paso de una red a otra no se realizaba de manera automática.

Por tanto, la solución presentada por la compañía americana no cumplió con los mínimos necesarios para ser considerada en un despliegue de misión crítica de acuerdo a los requisitos fijados.

4.4.5 Nokia

CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS BÁSICOS	
Capas presentadas	SOLUCIÓN COMPLETA DE RED
Banda Espectral	B28 y B31
eMBMS	NO
Interoperabilidad con otros	AIRBUS
Pasarela LTE-TETRAPOL	SI (PRESCOM)
Red privada - pública	SI

Tabla 4-5 Tabla resumen de los requisitos de la empresa Nokia.

Presentó una solución completa, usando el Core de red y los nodos radio de fabricación propia, tanto en B31 como en B28.

En cuanto a la capa de servicios, optó por el software *Team On Mission* del fabricante Streamwide.

Durante las pruebas ha utilizado diferentes modelos de terminal, todos ellos con capacidad eMBMS:

- RugGear RG760 (Banda B31).
- Nokia SPH220 (Bandas B31 y B28).
- Bittium Tough Mobile 2 (Banda B28).
- Crosscall Core X4 (Banda B28).
- Crosscall Core X5 (Banda B28).

Después de analizar los diferentes resultados, Nokia optó por utilizar el terminal Crosscall Core X5 como modelo más adecuado para dar respuesta a los requisitos propuestos.

La infraestructura de la compañía finlandesa es la que ofreció durante este periodo de pruebas preliminares una mayor calidad de servicio en términos generales, alcanzando su radio un mayor nivel de cobertura garantizando el servicio.

La pasarela LTE-Tetrapol empleada fue la del fabricante Prescom, proporcionando estabilidad en las comunicaciones sin pérdida de comunicados y establecimiento la primera comunicación en un tiempo en torno a 2 segundos.

La interoperabilidad entre la red privada y la pública fue igualmente conseguida siendo los trasposos de una red a otra relativamente rápidos en ambos sentidos.

En general, cumplía con toda la funcionalidad requerida, salvo el modo directo que de momento no está disponible de acuerdo al estándar 3GPP.

4.4.6 Primeras Impresiones

En la siguiente tabla se resume el grado de cumplimiento de los requisitos básicos de las diferentes soluciones evaluadas:

	AIRBUS	ERICSSON	HUAWEI	MOTOROLA	NOKIA
Banda espectral	SI	SI	SI	SI	SI
eMBMS	SI	SI	NO	NO	SI
3GPP/Interoperabilidad	SI	SI	NO	SI	SI
Pasarela LTE-TETRAPOL	SI	SI	NO	NO	SI
Interoperabilidad red privada - pública	SI	SI	NO	SI	SI

Tabla 4-6 Tabla resumen de los requisitos de las diferentes empresas presentadas.

Las soluciones de Huawei y Motorola no cumplieron con los requisitos exigidos por el para su futuro despliegue de banda ancha de mayores dimensiones.

La infraestructura de Nokia (RAN y core) tuvo un comportamiento más estable y con mayor calidad de servicio que la ofrecida por Ericsson.

En relación a la capa de terminales, a pesar de haberse probado diferentes fabricantes y modelos, el único terminal que cumplió con los requisitos, verificado y validado fue el Crosscall Core X5.

En cuanto a la capa de aplicación, las soluciones de Huawei y Motorola no satisficieron los requisitos, quedando como única opción la aplicación basada en *Team On Mission* de Streamwide, propuesto en diferentes versiones por Airbus, Ericsson y Nokia. De estas tres versiones, las de Airbus y Nokia presentaron más estabilidad.

Como principal conclusión reseñable de este entorno reducido de pruebas en campo, se pudo extraer que no se logró alcanzar el nivel de interoperabilidad pretendido entre las diferentes soluciones evaluadas, por lo que se hizo necesario continuar promoviendo este aspecto al objeto de garantizar diversidad de alternativas en cada una de las capas, y disminuir así el riesgo de ser nuevamente cautivos de un único fabricante tal y como lleva ocurriendo 24 años con la tecnología Tetrapol.

4.5 Aumentando el Orden de Magnitud: Un Piloto de Dimensión Provincial

A raíz de los resultados obtenidos a lo largo de un año de pruebas, (descritas en el apartado anterior), cabe preguntarse si no resultaría temerario tratar de desplegar una red de estas características con unas dimensiones de nivel provincial.

No cabe duda que el nuevo entorno de pruebas planteado implica una inversión de recursos significativa pero, por otro lado, las pruebas realizadas en el año 2022 se hicieron únicamente con 5 nodos LTE y 40 terminales radio. La SGSICS consideró que los estudios realizados hasta la fecha, no tenían la entidad y rigurosidad suficientes. Pese a ser una primera aproximación, no permitían validar correctamente la estabilidad de la mejor de las soluciones. De esas primeras conclusiones, tampoco se podía dar respuesta a una pregunta no planteada en el presente trabajo hasta la fecha: ¿Cuál es el factor multiplicador en el número de estaciones base para pasar la red nacional de banda estrecha a una red de banda ancha?

Por estos motivos, en marzo de 2023 se decidió desplegar la provincia de Alicante con la siguiente configuración²⁹ en base a criterios técnicos, funcionales, operativos y de riesgo:

- Capa Radio: NOKIA
- Capa Core: NOKIA
- Capa Servicios: NOKIA y/o AIRBUS
- Capa Terminales: Crosscall Core X5

Por un tema de agilidad de despliegue y para facilitar el estudio comparativo entre la red de banda estrecha y la nueva red de banda ancha, se decidió iniciar compartiendo el mayor número de emplazamientos entre ambas redes buscando sinergias en temas de alimentación, transmisión, red de transporte, etc.

Se estimó un tiempo inicial de despliegue y puesta en servicio (cumpliendo con toda la carga administrativa del Ministerio de Transformación Digital y Función Pública) de 6 meses, siguiendo un periodo de optimización y ajuste fino de 3 meses con vistas a que los usuarios finales de la provincia de alicante pudieran tener las primeras experiencias reales³⁰ a principio de 2024.

Con las premisas anteriores, se dio el *Kick off* al despliegue de la provincia de Alicante, no habiendo constancia de la existencia de ningún entorno de pruebas similar ni en España ni en el resto de Europa, suponiendo un reto lleno de expectativas por la contribución que desde la SGSICS se hacía en el campo de las comunicaciones críticas de emergencia.

A pesar de la adjudicación de este despliegue a Nokia, la compañía finlandesa llevó a cabo en Q3 de ese mismo año una reestructuración laboral que implicó el despido de 14.000 trabajadores, aproximadamente el 16 % de su plantilla global. Esta medida se debió a una disminución del 35 % en sus ingresos durante los primeros meses del año, buscando reducir costos y afrontar un panorama empresarial complicado marcado por el bajo rendimiento del mercado 5G, cuyas expectativas iniciales no se han materializado [53].

²⁹ Esta fue realizada conforme a las conclusiones alcanzadas en 2022 y descritas en 4.4.6

³⁰ Resulta conveniente matizar el término “experiencias reales”, debe repetirse que se trata de un piloto y que bajo ningún caso se podría omitir a la red SIRDEE dado que es el único sistema de comunicaciones críticas en producción.

Esta situación tuvo un impacto nefasto en el proyecto español ya que afectó a áreas clave como investigación, desarrollo e implementación incluyendo a los equipos responsables de personalizar la solución PPDR para Alicante, con una rotación que provocó la pérdida de la mayor parte del *Knowhow* adquirido durante el 2022 así como retrasos muy significativos en el suministro del equipamiento de red.

Consecuencia de todo esto, fue el incumplimiento de la planificación prevista ya comentada anteriormente. En diciembre de 2023 se había desplegado aproximadamente el 40% de la extensión de la provincia, y en las primeras pruebas de eMBMS había grandes problemas que afectaban a la estabilidad de la solución.

La situación de finales del año 2023 ponía en un serio aprieto la viabilidad del proyecto, y más importante aún, dar cumplimiento al Pliego de Prescripciones Técnicas del contrato SIRDEE actual [37]. La SGSICS tomó la acertada decisión de dar la oportunidad a otro fabricante haciendo un despliegue en la provincia de Albacete con una doble finalidad:

- Dar cumplimiento al contrato anteriormente mencionado.
- Provocar la reacción del fabricante Nokia al sentir la presión real de un nuevo competidor.

La configuración para la provincia de Albacete fue:

- Capa Radio: Ericsson.
- Capa Core: Ericsson.
- Capa Servicios: Airbus.
- Capa Terminales: Crosscall Core X5.

El resultado final de este tedioso proceso fue que en marzo de 2024, la SGSICS tuvo a su disposición dos provincias desplegadas (en lugar de una) cuya cobertura teórica y comparada con el sistema actual de banda estrecha se muestra a continuación:

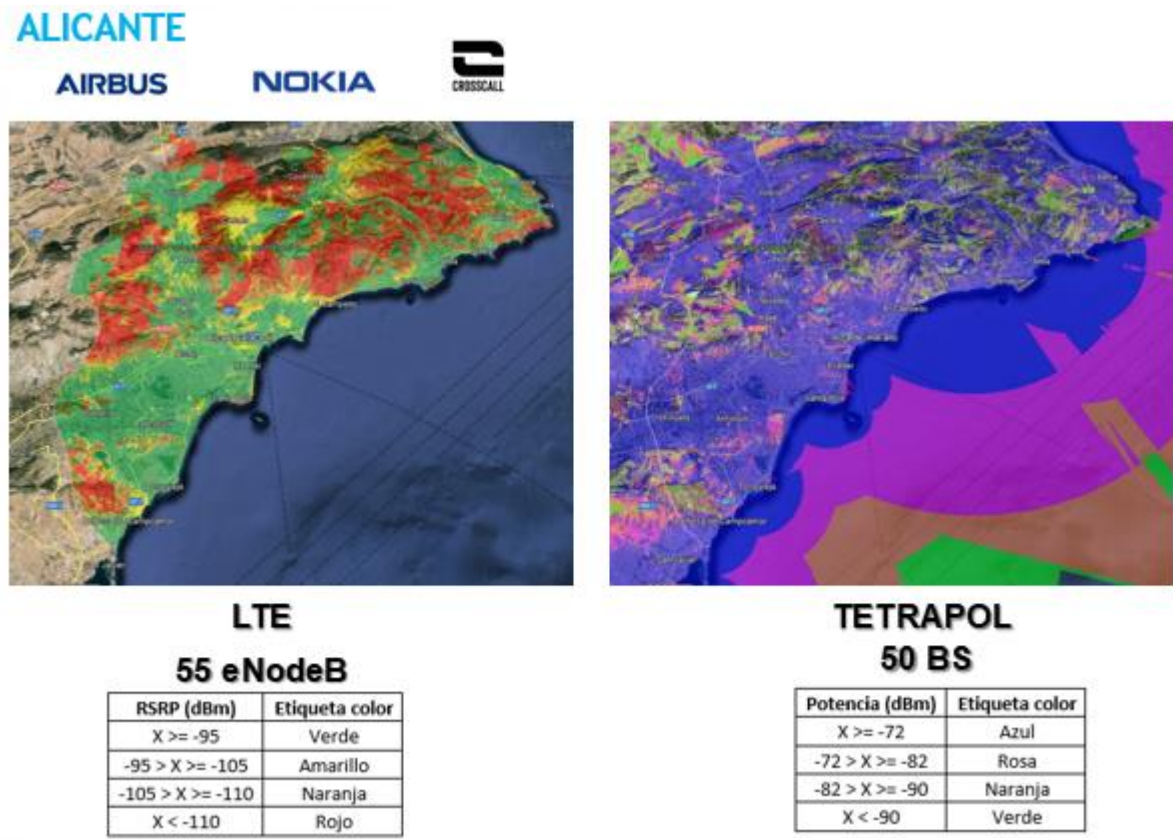


Figura 4-1 Cobertura teórica de la provincia de Alicante LTE y Tetrapol.

A la vista de la misma, cabe destacar que la cobertura del piloto LTE apenas tiene incidencia en el mar, por lo que en las pruebas de casos de uso de los usuarios finales no tienen cabida unidades como el Servicio Marítimo de la Guardia Civil.

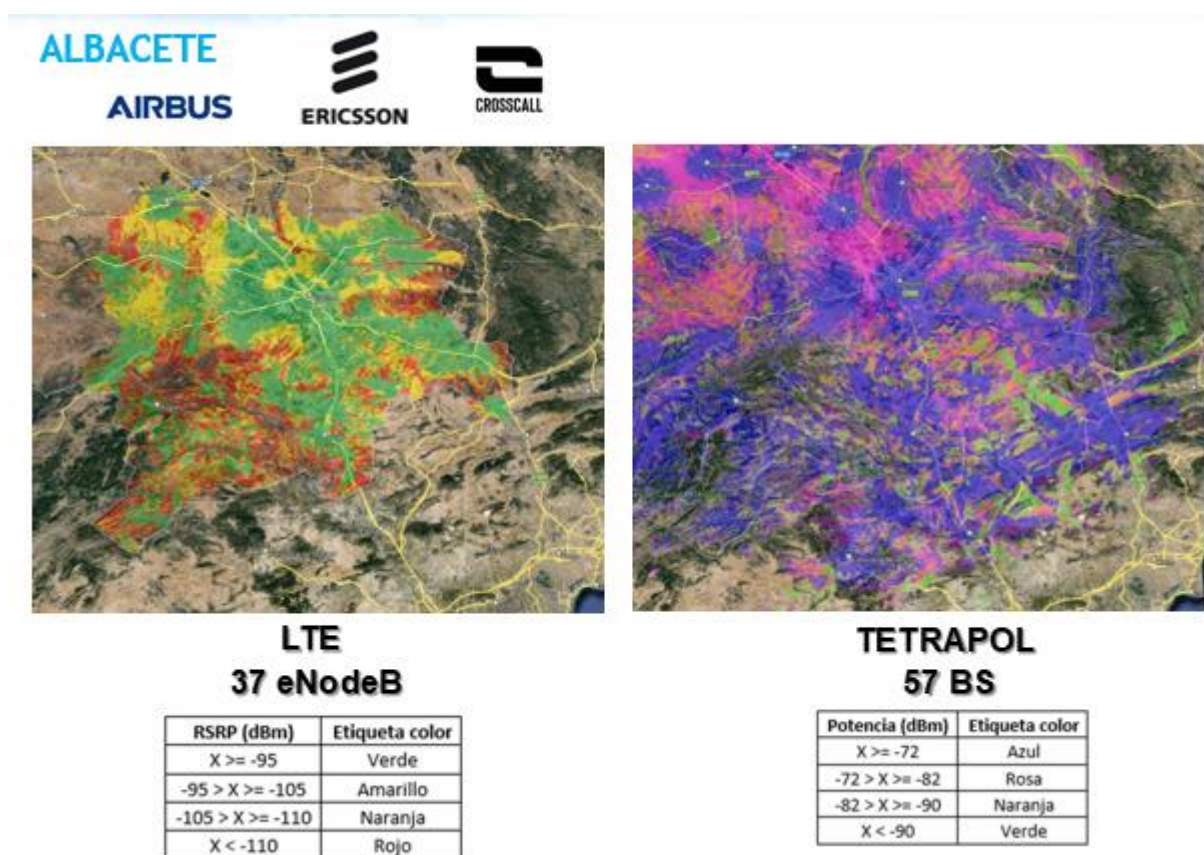


Figura 4-2 Cobertura teórica de la provincia de Albacete LTE y Tetrapol.

4.6 La Importancia de la Optimización y el Ajuste Fino

El rango de cobertura de un emplazamiento radio en términos de extensión geográfica es un parámetro importante a la hora de abordar una red de ámbito nacional, de cara a poder determinar un primer factor multiplicador en el número de *sites* necesarios para pasar del sistema de banda estrecha a la banda ancha.

En la provincia de Albacete, a pesar de su orografía, se han alcanzado distancias de hasta 54 kilómetros con la transmisión de un único nodo, obteniéndose los resultados que se muestran en la figura 4-3.

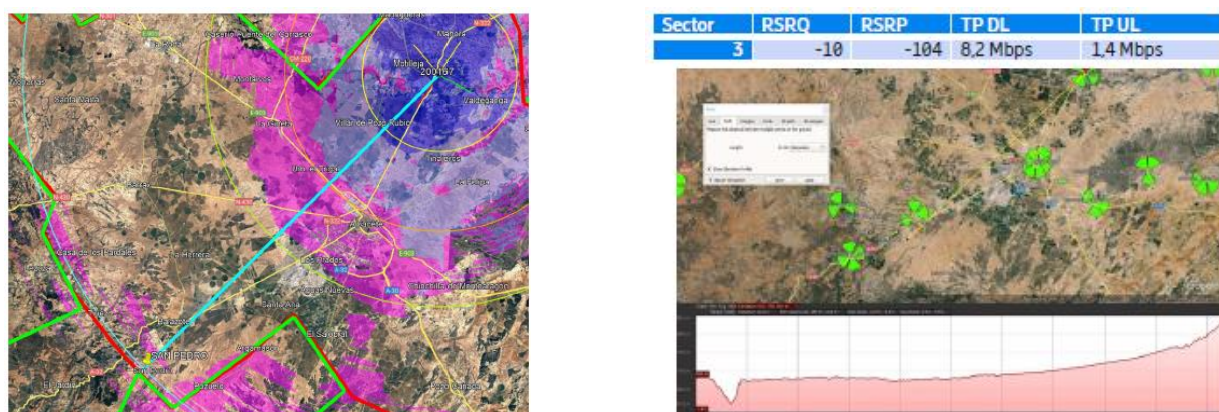


Figura 4-3 Alcance máximo de Tx de único nodo LTE en la provincia de Albacete (tomado de [54]).

Por otro lado, ya fue introducido en el apartado 3.4 de este trabajo la necesidad de implementar técnicas de eMBMS dado el escaso espectro radioeléctrico disponible para el despliegue de una red dedicada.

La implementación de eMBMS aplica la transmisión MBSFN (*multicast*) en enlace descendente mientras que aplica *unicast* en enlace ascendente [55]. Un área MBSFN (*Multicast Broadcast Single Frequency Network*), es un grupo de celdas que reciben la misma señal de manera síncrona; Permite compartir la misma transmisión de datos, lo que permite recrear llamadas de grupo entre varios terminales (UEs *users equipment*).

Una portadora eMBMS, (necesaria para establecer una llamada de grupo) permite un número ilimitado de terminales sobre la misma portadora *multicast*, pero hay que tener en cuenta la limitación que únicamente se puede configurar un máximo de 60% de los recursos como multicast [55].

Esto significa que de los 3 MHz disponibles en banda B28 tan sólo 1.8 MHz pueden ser utilizados con eMBMS y los nada despreciables 1.2 MHz restantes deben cursar tráfico en *unicast* debiéndose combinar ambos modos de transmisión de una manera constructiva, lo cual implica un meticuloso proceso de optimización como se tratará de explicar a continuación.

MBSFN es un modo de transmisión que aprovecha la interfaz de radio OFDM de LTE para enviar datos de multidifusión o difusión como transmisión multicelda a través de una red sincronizada de frecuencia única (SFN *single frequency network*) teniendo en cuenta que [56]:

- Las transmisiones desde las múltiples células sincronizadas, hacia los UEs, deben llegar dentro del prefijo cíclico OFDM (CP), para evitar interferencias entre símbolos (ISI) siendo este de unos 5 kilómetros.
- Bajo la premisa anterior, la transmisión MBSFN aparece ante un equipo de usuario como una transmisión procedente de una única célula de gran tamaño, lo que aumenta drásticamente la relación señal/interferencia (SIR) debido a la ausencia de interferencias entre células.

Más allá del periodo de prefijo cíclico, se van produciendo una pérdida en la eficacia de recepción a distancias largas, tal y como se observa en la figura 4-4.

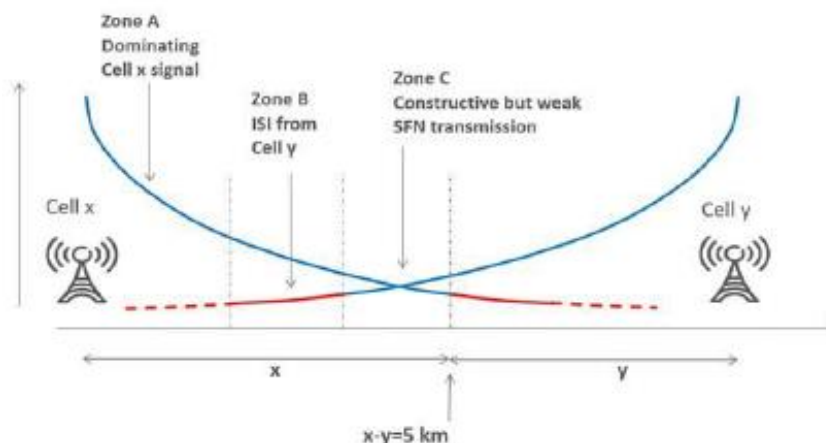


Figura 4-4 Efecto de la distancia entre sites LTE (tomado de [55]).

Es por todo lo anterior, que la máxima distancia recomendada entre emplazamientos eMBMS sea del orden de 5 kms [55]. Una primera conclusión que se desprende a partir de este criterio de diseño es que no todos los eNB de la red piloto pueden ser configurados en *multicast* ya que, de ser así, el factor multiplicador de la conversión banda estrecha vs. banda ancha haría inviable el proyecto. Por lo tanto, la parte fundamental del proceso de optimización ya comentado va orientado en la filosofía de definir áreas MBSFN y *unicast* respectivamente para maximizar la capacidades de transmisión a la vez que se minimiza el número de estaciones base a implantar.

4.6.1 Estudio de la Capacidad eMBMS

Hay infinidad de variables que impactan en el máximo número de sesiones eMBMS que pueden ser establecidas simultáneamente en canal descendente, (DL *down link*) y que se dividen básicamente en dos tipos [55]:

- Capacidad propia de la tecnología proporcional al ancho de banda disponible (en el caso objeto de estudio 3MHz en banda B28) y los criterios de diseño (MCS, target BLER, GBR definido, etc.)
- Capacidad propia de la implementación del fabricante es decir los límites del *hardware* seleccionado.

Entrando en los criterios de diseño asociados a la tecnología, el esquema MCS (*Modulation and Coding Scheme*) afecta la cantidad de datos que pueden ser transmitidos y la cobertura alcanzada [55]:

- Esquemas más avanzados (MCS alto) aumentan la capacidad, pero requieren mejores condiciones de señal, es decir una SINR³¹ alta (*Signal to Interference plus Noise Ratio*).
- En zonas rurales con baja densidad de población, puede ser preferible un MCS más bajo que ofrezca mayor alcance pero sin provocar interferencias a las áreas MBSFN cercanas.

La figura 4-5 ilustra el número máximo teórico de sesiones eMBMS simultaneas en función del MCS utilizado teniendo en cuenta los dos factores anteriores.

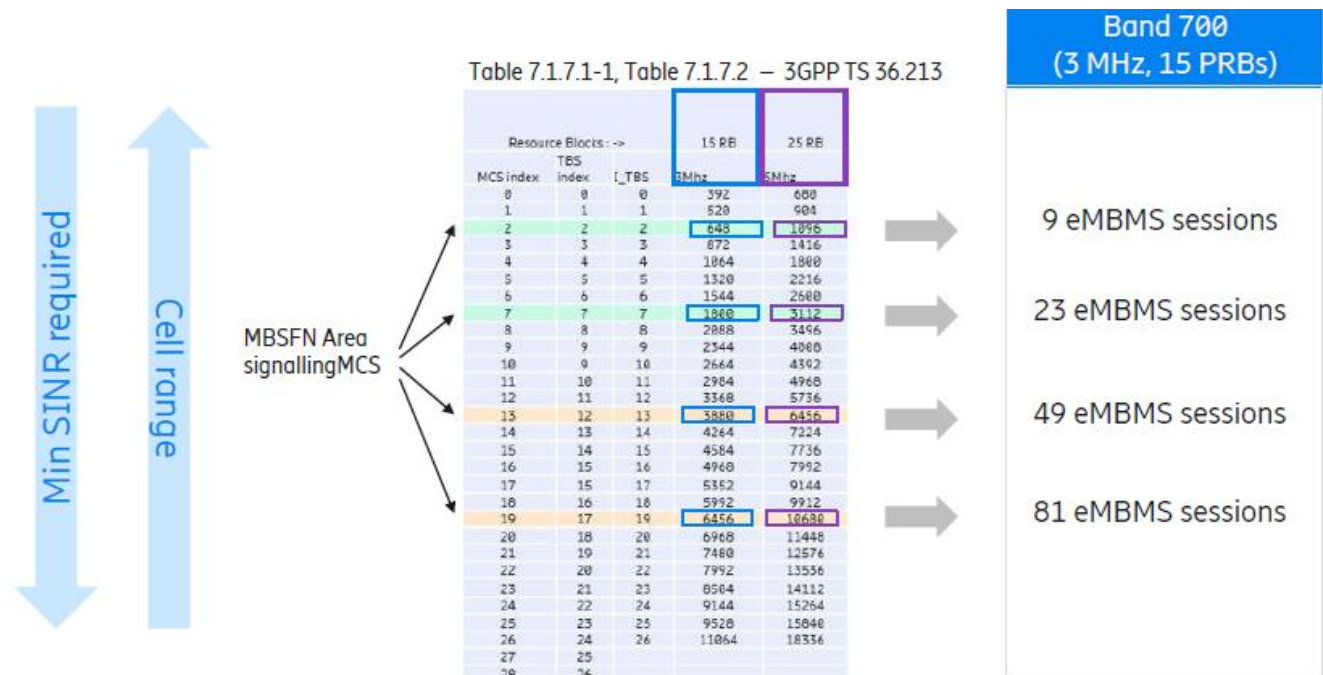


Figura 4-5 Capacidad de señalización MCS por área MBSFN (tomado de [55]).

Otro parámetro es la tasa de transferencia garantizada, GBR (*Guaranteed Bit Rate*) es vital para garantizar que las comunicaciones esenciales (por ejemplo, voz crítica o video de emergencia) tengan prioridad sobre otras transmisiones menos importantes y mantengan una calidad constante independientemente de la congestión en la red. La elección de un GBR determinado tiene una incidencia directa en número máximo de llamadas de grupo eMBMS que el canal descendente puede soportar. Para el caso de servicios PPTx valores normalizados son [54]:

³¹ La SINR o Relación Señal a Interferencia más Ruido, es una medida clave en telecomunicaciones que indica la calidad de una señal recibida en un entorno con interferencias y ruido. Es un parámetro fundamental para evaluar el rendimiento y la eficiencia de las redes LTE o 5G.

- PTT: un GBR de 20-25 Kbps es suficiente para comunicaciones de voz confiables y claras.
- PTV: Un GBR de 300-500 Kbps es adecuado para video estándar, pero puede incrementarse según las necesidades específicas de calidad y resolución.

Las tablas 4-7 y 4-8 ilustran lo anterior para aplicaciones de *Push to Talk* (con un MCS de valor 9) y *Push to Video* (con un MCS de valor 11):

Data MCS	QCI	Peak Bit Rate per RB and Subframe [MCS]	MultiCast Cell Capacity @3 MHz [Mbps]	Modulation	Min SINR required	Max number of PTT group calls (GBR @10 Kbps)	Max number of PTT group calls (GBR @30 Kbps)	Max number of PTT group calls (GBR @50 Kbps)
7	1	11,12	1,0008	QPSK	8,8	100	33	20
8	8	12,50	1,1250	QPSK	10,0	113	38	23
9	7	14,34	1,2906	QPSK	12,0	129	43	26
10	3	14,34	1,2906	16QAM	12,0	129	43	26
11	6	15,72	1,4148	16QAM	12,0	141	47	28
12	2	17,80	1,6020	16QAM	12,8	160	53	32
13	5	20,56	1,8504	16QAM	14,9	185	62	37
14	9	23,28	2,0952	16QAM	19,5	210	70	42
15	4	25,36	2,2824	16QAM	> 35	228	76	46

Push-To-Talk

Tabla 4-7 Número máximo de llamadas de grupo PPT en DL en función del GBR (tomada de [55]).

Data MCS	QCI	Peak Bit Rate per RB and Subframe [MCS]	MultiCast Cell Capacity @3 MHz [Mbps]	Modulation	Min SINR required	Max number of PTV group calls (GBR @500 Kbps)
7	1	11,12	1,0008	QPSK	8,8	2
8	8	12,50	1,1250	QPSK	10,0	2
9	7	14,34	1,2906	QPSK	12,0	3
10	3	14,34	1,2906	16QAM	12,0	3
11	6	15,72	1,4148	16QAM	12,0	3
12	2	17,80	1,6020	16QAM	12,8	3
13	5	20,56	1,8504	16QAM	14,9	4
14	9	23,28	2,0952	16QAM	19,5	4
15	4	25,36	2,2824	16QAM	> 35	5

Push-To-Video

Tabla 4-8 Número máximo de llamadas de grupo PPV en DL para un GBR de 500 kbps (tomada de [55]).

El *uplink* o enlace ascendente (UL), se basa únicamente en la transmisión *unicast*, por lo tanto, 100% del ancho de banda se comparte entre todos los usuarios transmitiendo simultáneamente. El *Modulation Coding Scheme* se asigna dinámicamente por el eNB dependiendo, entre otros factores, de las condiciones del entorno radio del usuario. Condiciones radio menos favorables darán lugar a un menor número de usuarios simultáneos [56].

En cuanto a los límites de capacidad eMBMS atribuidos a la implementación de los distintos fabricantes para los entornos pilotos descritos en este capítulo (fabricantes Ericsson y Nokia), tenemos [54]:

- Número de áreas MBSFN activadas en un eNB: 8, coincidiendo este valor con el límite especificado por 3GPP [57].
- Número de portadoras eMBMS sobre un canal PMCH³²: 28, siendo el límite especificado en 3GPP de 29 [57].
- Número de portadoras eMBMS en un eNB para el servicio PPT: 224, (el teniendo en cuenta que se usa el 60% ancho de banda disponible)
- Número atachados por banda base: 2000.

³² El PMCH (Physical Multicast Channel) es un canal físico en redes LTE diseñado específicamente para transmitir datos multicast o broadcast en el contexto de eMBMS

Los límites del hardware están muy por encima de los límites de la tecnología en función del MCS, GBR y otros parámetros que ya han sido explicados previamente.

4.6.2 Optimización del Piloto de Albacete

Para optimizar el piloto de la provincia de Albacete teniendo en cuenta todo lo argumentado en este apartado 4.6, los 37 eNB de la provincia se organizaron en una única MBSFN (para no perder inicialmente capacidad de reparto entre diferentes áreas). A su vez, se hizo una selección de los 19 eNB más dominantes según su ubicación denominada *golden cluster*. Durante las pruebas, este se configuró en *multicast* y *unicast* para ver cómo se comportaba el piloto. Los criterios establecidos fueron:

- Ganar cobertura *unicast*, aumentando alcance de celdas dominantes, a costa de ver cómo afecta a las zonas eMBMS.
- Priorización *multicast* en poblaciones principales.
- Mantener el periodo del CP dentro de la MBSFN para no añadir más complejidad.

La existencia de nodos dominantes es crucial en los sistemas *legacy* actuales (Tetra y Tetrapol) ya que permiten estrategias de mallado para tener una red lo suficientemente tupida para que en caso de caída de una estación base se pueda recibir cobertura de otro emplazamiento en una posición dominante. Sin embargo con la tecnología eMBMS ocurre lo siguiente:

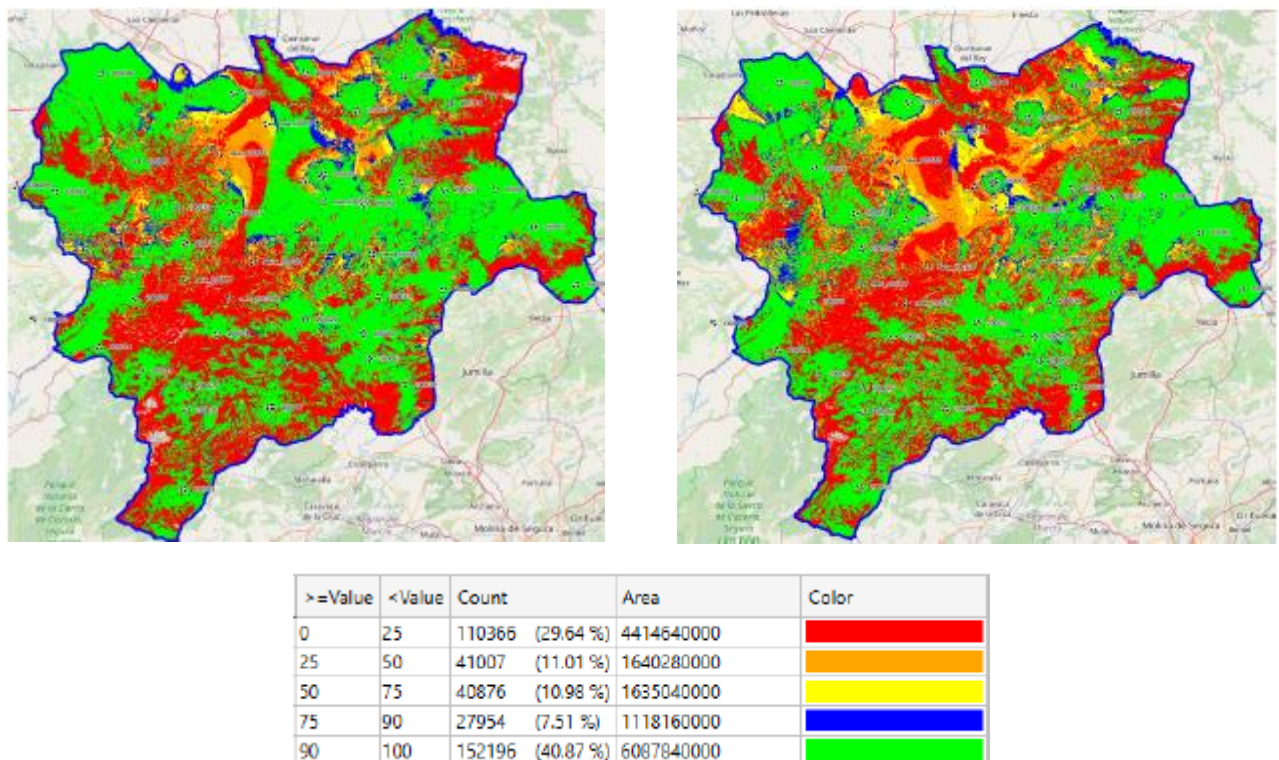


Figura 4-6 Probabilidad de cobertura multicast en función del alcance de los eNB dominantes [54].

En la leyenda de la figura 4-6, el color verde representa la mayor probabilidad de disponer de cobertura eMBMS siendo el resto una disminución de la misma hasta llegar al valor mínimo representado en rojo.

La imagen de la izquierda muestra la probabilidad ya comentada sin aumentar el alcance de los nodos dominantes estando los 37 eNB configurados en modo *multicast*. Al aumentar el alcance de los nodos dominantes, se reduce la probabilidad (aparecen más zonas rojas, y naranjas) como se puede observar en la imagen de la derecha. El impacto interferente en zonas de la meseta central como

Albacete capital y alrededores es mucho mayor por lo que se comprueba un efecto indeseable que hay que evitar en un entorno de gran densidad de población como es la capital de la provincia.

En términos de capacidad del enlace descendente, (recuérdese que es el único que puede funcionar en *multicast*), se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación:

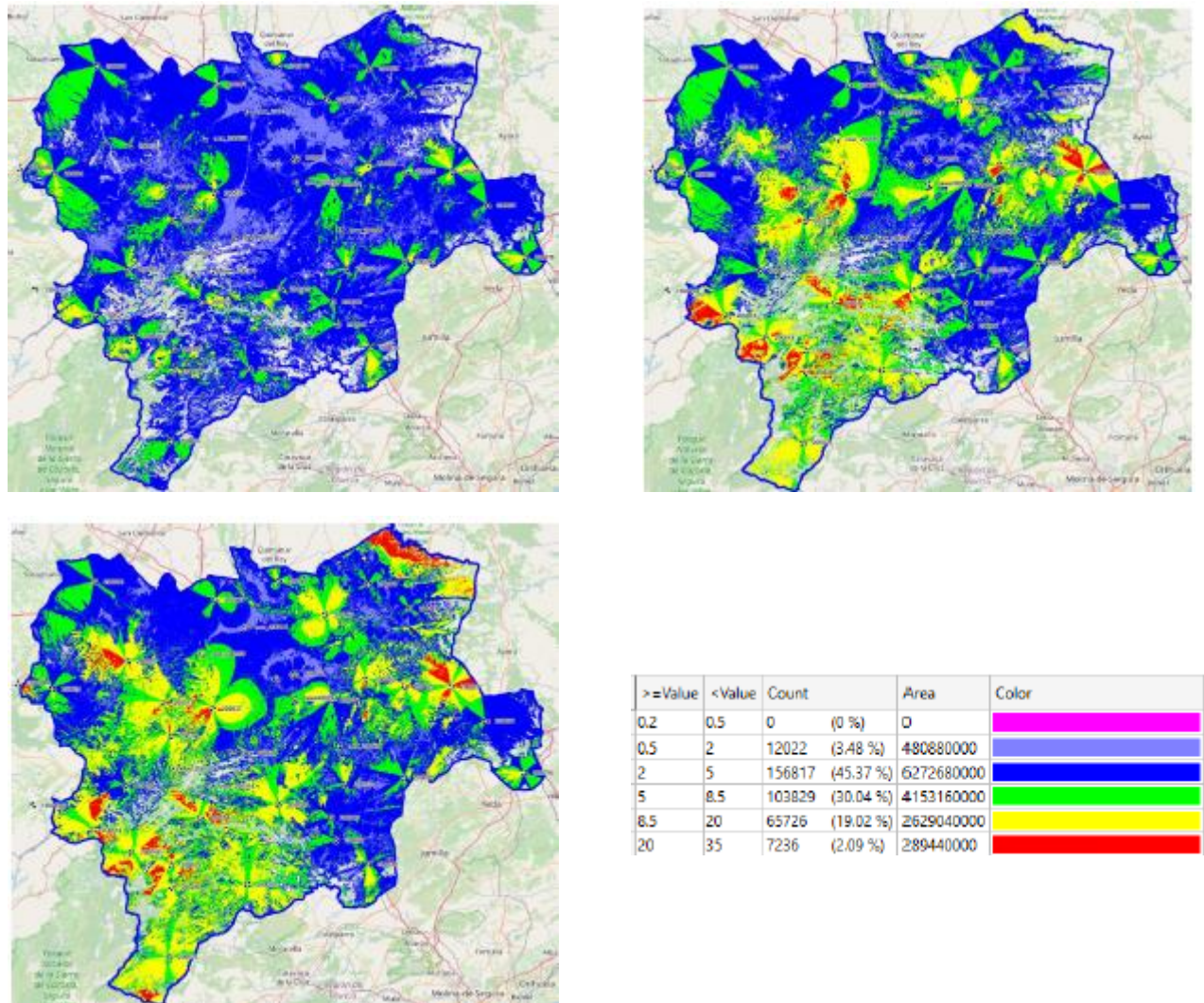


Figura 4-7 Capacidad del DL con todos los eNB en *multicast* y con los 19 eNB dominantes en *unicast* [54].

En el caso de la leyenda de la figura 4-7, el color violeta se corresponde con la menor capacidad en canal descendente llegando de manera gradual a la máxima representada en rojo. Al pasar de una configuración de todo eMBMS (imagen arriba izquierda) a una con el *golden cluster* en modo *unicast* (imagen arriba derecha), mejora la capacidad por liberarse recursos en los nodos sin eMBMS. De igual manera, se puede mejorar el DL (imagen abajo izquierda) realizando optimizaciones del RSRP y el PDSCH puesto que además de liberar recursos se aumenta el alcance de los mismos.

Con estas pruebas queda demostrado el grado de mejora alcanzable. Aun así, debe quedar claro que la ubicación de los eNB en los emplazamientos del sistema de banda estrecha puede que no sea la ubicación más apropiada de los mismos; quedaría pendiente el estudio de su colocación geográfica dentro de la provincia, lo cual queda fuera del alcance de este TFM.

Con toda esta parametrización y optimización se ha conseguido reproducir en campo real sobre la provincia de Albacete [54]:

- 28 portadoras simultáneas de eMBMS para PPT.
- 5 portadoras simultáneas para PPTV + 1 portadora para PPT.

4.6.3 Otras Configuraciones Pendientes

Como quedó argumentado en el capítulo 3, el inicio de una potencial transición hacia una solución con capacidades de banda ancha estaría sustentado en un modelo híbrido utilizando como base una red dedicada y el complemento de las redes comerciales allí donde la cobertura de la primera fuera deficiente.

El *roaming* entre ambas redes, también conocido como *data switch*, es muy importante para la buena percepción y aceptación del futuro sistema; ha de ser ágil y estable en ambos sentidos, debe dar solución a problemas tales como mantener la comunicación de terminales que se encuentran en una llamada de grupo en una MBSFN y estando en movimiento pierden cobertura de la red dedicada entrando en zona de red comercial donde las comunicaciones pasan a *unicast* en el DL, pero que por seguir en movimiento vuelven a entrar en zona de cobertura de la red privada.

La gestión de las comunicaciones en el caso anterior no es un asunto baladí. Mientras que los estudios anteriores le correspondían mayormente a los fabricantes de RAN y Core, este nuevo reto presentado es tema de los fabricantes de los equipos de usuario.

La primera aproximación al mismo está orientada a basar la histéresis del cambio red dedicada/comercial en una monitorización del RSRP (*Reference Signal Received Power*) midiendo la potencia promedio recibida de las señales de referencia transmitidas desde ambas redes; dedicada y comercial [55]. Esto no satisface uno de los requerimientos impuestos por la SES; mantenerse en la red dedicada tanto como lo permitan la inteligibilidad y estabilidad de las comunicaciones. Dado el gran número de eNB de redes comerciales desplegados en nuestro país, en muchas ocasiones el RSRP de redes comerciales en Albacete era mayor que el de la red dedicada y, pese a tener comunicaciones inteligibles en esta red, provocaba el *roaming* a la red comercial en la que los usuarios no disponen QPP al ser un servicio *best effort*.

Por otro lado, el proceso de *roaming* no era para nada inmediato, del orden de 20 segundos, no pudiendo ser asumible en caso de una operativa policial real.

En la problemática del *data switch*, el RSRP es una condición necesaria pero no suficiente. Se hace necesario una métrica más avanzada, encontrando un gran aliado en el RSRQ. Este parámetro, el *Reference Signal Received Quality*, mide la calidad de la señal de referencia recibida. Es una métrica más avanzada que el RSRP, ya que no solo considera la potencia de la señal, sino también el nivel de interferencia y ruido en el canal [57].

El RSRQ es una medida de calidad relativa y por lo tanto permite mejorar la histéresis de cambio entre ambas redes a un momento más idóneo. Implementaciones de *data switch* basadas en esta medida de calidad, han permitido bajar los tiempos de cambio a unos 2-5 segundos (debe mejorar más).

A pesar de lo expuesto, y tal como ocurrió con la implementación del eMBMS, estos cambios de configuración no están libres de desventajas; el algoritmo de cambio en función de las medidas y procesado a realizar por parte de los UEs penaliza mucho la duración de la batería un factor que tiene un impacto notable, ya que los equipos de usuario prácticamente funcionan 7x24 a turnos de 8 horas.

4.7 Las Primeras Impresiones de los Usuarios Finales

Ya ha sido comentado en otras partes de este capítulo, entre los meses de abril y mayo de 2024, se llevaron a cabo, por parte de Policía Nacional y Guardia Civil, pruebas de usuario del despliegue de red LTE en las provincias de Albacete y Alicante, al objeto de conocer la opinión de estos y poder depurar la solución definitiva.

Durante estas pruebas, los usuarios completaron un formulario para recopilar los comentarios acerca del uso de la red, así como la aplicación y el terminal dispuestos para las pruebas, enfocándose en la funcionalidad y experiencia de uso de los mismos.

Los casos de uso planteados en el cuestionario fueron [58]:

- Comunicaciones PTT preestablecidas.
- Comunicaciones desde la agenda de contactos (con un usuario y con grupos de llamadas).
- Comunicaciones de mensajería.
- Otros casos de pruebas: Llamadas de emergencia, hombre caído, geolocalización y pasarela con TETRAPOL.

Además, se dejaba libertad al usuario para incluir otras pruebas de interés. Toda la batería de pruebas se llevó a cabo utilizando la configuración (RAN, Core, MCX y terminales) presentados en el apartado 4.5 de este trabajo. Tras el análisis de toda la información, [59], [60], los resultados más reseñables fueron los que se muestran a continuación.

En relación a comunicaciones PTT preestablecidas, la tecla PTT se pulsa accidentalmente con suma facilidad al estar muy expuesta. No hay un testigo en pantalla claro que indique que se está pulsando la tecla. Durante las comunicaciones con PTT no se puede saber quién está emitiendo salvo que el terminal esté desbloqueado y en la pantalla “grupos”. Durante una emisión PTT, al bajar el volumen con los botones del lateral derecho, no se puede volver a subir el volumen hasta que no se vuelva a emitir.

Referente a las comunicaciones desde la agenda, en condiciones de poco ruido ambiental se escuchaba con buen volumen pero, en situaciones más ruidosas como en carretera, no; salvo que se sujetara cerca de la oreja. Se hacía necesario un accesorio externo tipo micro extendido. En las comunicaciones individuales, convendría que se pudiese activar la función de escuchar por el altavoz.

En conferencia telefónica, si hablaban dos usuarios simultáneamente se entrecortaba la comunicación afectando gravemente la inteligibilidad del mensaje.

El video se reproducía sin audio en vivo. En videollamadas y vídeo en vivo, la calidad de la imagen por defecto 320x240 24fps no era muy alta aunque es aceptable, pero no da opción de aumentarla.

El control de volumen debería unificarse para que sirva tanto para multimedia como para las llamadas. A veces el audio no es muy claro llegando en ocasiones a ser metálico.

En las comunicaciones en grupo se detectaron muchos problemas con la calidad de audio. Si hablaban más de dos usuarios a la vez se perjudicaba gravemente la inteligibilidad del mensaje. Igualmente, a veces existía ruido de fondo que no permite la inteligibilidad de la voz.

Al realizar una llamada de Vídeo en Vivo, el que llama no puede activar la linterna, y en videollamadas, al activarla se cuelga la videollamada.

En los casos de uso relacionados con el servicio de mensajería, no se encontró la forma de enviar ubicación actual de forma predeterminada, había que buscar previamente la posición en el mapa.

El envío de posición es una idea muy útil pero la ejecución fue muy pobre. Es lento y requiere estar en el exterior. Tendría que poder usar AGPS para un posicionamiento rápido. El receptor debería tener opción de centrar el mapa cuando se mueve y otra para obtener una ruta hasta el punto desde su posición. La calidad de las fotos es aceptable, pero no hay opciones para aumentar el detalle. Falta la opción de almacenar fotos o vídeos en la galería para poder enviarlos en cualquier momento. No almacena en memoria, solo permite tomar la foto en el momento de enviar el archivo. La posibilidad de envío de documentos a través de mensajería es muy útil, aunque el dispositivo no dispone de las aplicaciones para abrir los archivos tipo pdf u otros.

Sobre la sección ‘otros casos de prueba’, en la llamada de emergencia, el botón en pantalla es redundante y fácil pulsarlo, aunque pide confirmación. El botón físico de las llamadas de emergencia es demasiado sensible y se activa con demasiada frecuencia de forma accidental. Debería buscarse algún sistema para evitar falsos positivos. La pasarela funcionaba correctamente, aunque sólo estaba configurado el grupo de comandancia (GC) y el de seguridad ciudadana (PN).

Otras pruebas realizadas a libertad de los usuarios, reportaron más detalles sobre la batería, el audio y las llamadas.

Con carga de la batería al 100% a las 07:00h de la mañana y con *bluetooth* conectado para comprobar la duración de la batería, a las 24h tenía un 34% de carga, estando encendido solo a la escucha, exceptuando 7h nocturnas que no se permanece en ningún grupo y solo está encendido. A las 28h se le agota la batería. Su carga era relativamente rápida. La batería tendría que ser imperiosamente extraíble para poder ponerlas en carga independientes y no tener que dejar el terminal en base cargando, disminuyendo el tiempo de utilización.

El altavoz se oía poco en el vehículo de 4 ruedas con el ruido, como un teléfono con el altavoz activado, sería necesario un sistema para conectarlo al vehículo para poder oír las transmisiones adecuadamente. En el cinturón en una funda, también se oía poco. En el bolsillo del pecho de la chaqueta de motorista el sonido es aceptable en un ambiente que no sea ruidoso. Si se modificaban los decibelios del altavoz a más de 0 se satura el altavoz y no se escuchaba bien.

En pruebas de los diferentes tipos de llamadas, al pulsar para hablar con la central con la pantalla apagada, no había forma de saber si estaba emitiendo o no, desconociendo la razón al no recibir respuesta, (porque realmente no emite, porque no hay cobertura, etc.). Cuando se desbloquea la pantalla el único indicador de que se está emitiendo es un pequeño punto verde o una elipse de color verde en la esquina superior derecha. Sería aconsejable, que cuando se estuviera haciendo uso, hubiera algo que diera constancia de ello, que se encendiera el led de notificaciones, que se encendiera la pantalla, que emitiera un pitido, cualquier alternativa que haga saber que se está en línea.

En cuanto a los botones físicos del terminal de Crosscall, el pulsador PTT del terminal es muy pequeño y muy sensible, se pulsa con facilidad.

La pantalla tenía un brillo aceptable, permitiendo su operación con guantes de motorista pero no anti corte.

Como resultado de las pruebas, la primera impresión de los usuarios acerca de la alternativa presentada al sistema actual de banda estrecha fue:

- Sobre la aplicación MCX:
 - En general, se aprecia que la interfaz de la aplicación es poco intuitiva.
 - Se realizan muchas llamadas de forma accidental debido a la sensibilidad de los botones, ya sea PPT o Emergencias.
 - No es sencillo saber en qué momentos se está transmitiendo y de quién se recibe un comunicado.
 - No se puede controlar fácilmente el volumen, ya que, depende de si se está recibiendo un comunicado o no para poderlo variar, lo que hace difícil regular la discreción del terminal o la información recibida.
 - La calidad de audio no es buena, habiendo algunas quejas de sonido metálico, nivel bajo o inteligibilidad en determinadas situaciones.
 - La funcionalidad de geoposicionamiento debe mejorar, permitiendo al usuario poder compartir su ubicación de forma más intuitiva, así como recibir en tiempo real la ubicación de sus compañeros de grupo.
- Sobre el terminal:

- Parece que la autonomía de batería es suficiente, si bien, es mandatorio disponer de baterías reemplazables que puedan cargarse por separado para no reducir la operatividad.
- El nivel de audio proporcionado por el altavoz no es suficiente para entornos ruidosos, como una carretera.
- Posibilidad de conectar accesorios Bluetooth como auriculares o el sistema de audio del vehículo.
- Se requiere algún sistema visual de aviso cuando se envían o reciben comunicados, ya sea en pantalla o a través de un LED.
- Sobre la cobertura:
 - Algunos puestos indican apreciar una mejor calidad del servicio respecto a la red de banda estrecha, otros que tienen un nivel de cobertura similar y otros que hay zonas que no están cubiertas. Es evidente que cada zona geográfica tiene un grado de cobertura diferente, sufriendo en la actualidad un agravio las zonas más rurales y menos pobladas (coincidentes principalmente con la demarcación operativa de Guardia Civil) esto requiere un trabajo de optimización e incorporación de nuevos nodos en estas zonas.

Esta ‘carta a los Reyes Magos’ ha sido reportada a los diferentes fabricantes involucrados en el proyecto de cara a incluir mejoras en sus *roadmaps* de producto y versionado *software* no teniendo en la actualidad una estimación clara de cuando se implementarán³³.

4.8 Conclusiones del Capítulo

Montar un piloto de las dimensiones de una provincia española es un proyecto apasionante, que implican infinidad de retos y condicionantes que en ocasiones dependen de factores tan incontrolables como la situación de las empresas participantes y sus políticas de gestión del talento.

Las especificidades del caso español, hacen que para aumentar el orden de magnitud de un piloto, pasando del laboratorio y un pequeño territorio a toda una provincia, sea necesario implementar y optimizar la transmisión eMBMS puesto que proporciona una alta eficiencia para mapear muchos usuarios en una portadora *multicast* en el enlace descendente con un espectro limitado (3 MHz). Múltiples variables pueden tener un impacto en el número máximo de portadoras eMBMS, tanto variables dependientes de la tecnología como variables de la propia implementación del fabricante.

El punto óptimo del sistema eMBMS es objeto de la optimización del sistema y de los *inputs* a proporcionar; siendo de suma importancia de cara a los usuarios finales puesto que ‘solo existe una oportunidad para causar una primera impresión’.

Después de sus primeras experiencias en las provincias de Albacete y Alicante el veredicto ha sido dispar, siendo la Guardia Civil la organización más reacia, motivada por su demarcación operativa de zonas rurales con menor densidad de población en las que la cobertura de red dedicada es menor y por criterios de diseño no se implementan técnicas *multicast*.

³³ Una vez más, se está a merced de lo argumentado en el apartado 3.4.4

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Al llegar al final de este trabajo, es necesario verificar, si a través de las líneas de investigación propuestas y siguiendo la metodología establecida, se logra confirmar la hipótesis principal planteada, es decir, el uso de las nuevas tecnologías de comunicaciones móviles como LTE, 5G son adecuadas para evolucionar el sistema actual de comunicaciones tácticas y operativas de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado hacia capacidades de banda ancha, mejorando así el servicio. En el presente TFM se han llegado a las siguientes conclusiones.

Eventos como desastres naturales de gran magnitud, atentados terroristas, accidentes graves y, en general, situaciones de emergencia que demandan una respuesta rápida y coordinada de diversos servicios públicos, evidencian la importancia de disponer de sistemas de comunicaciones exclusivos que aseguren una alta disponibilidad en todo tipo de circunstancias, ya sean ordinarias o excepcionales.

Las redes conocidas como PPDR, poseen una serie de características específicas que las distinguen de las redes de uso general, permitiendo a los servicios de seguridad y emergencias operar de manera eficiente, reduciendo riesgos y asegurando una respuesta óptima en escenarios críticos. Entre estas características destacan: alta disponibilidad, robustez, seguridad, fiabilidad y estabilidad. Además, deben adaptarse a los requerimientos operativos de dichos servicios, ofreciendo capacidades esenciales como comunicaciones grupales y funcionamiento en modo directo.

Actualmente, las redes PPDR se sustentan principalmente en tres tecnologías predominantes, todas basadas en sistemas de comunicación trunking: TETRA y TETRAPOL, con despliegues globales, y APCO P25, implantada principalmente en América, especialmente en Estados Unidos y Canadá.

En España, la red PPDR que proporciona servicios de voz y datos a nivel nacional es conocida como SIRDEE, operativa desde el año 2000 y basada en la tecnología propietaria TETRAPOL desarrollada por AIRBUS D&S.

Desde sus inicios, la decisión del Ministerio del Interior de adoptar un modelo de servicios para la implementación, operación y gestión del SIRDEE, tomada a comienzos del año 2000, demostró ser un acierto, contribuyendo a consolidar esta red como un referente en la gestión de redes de seguridad y emergencias. Sin embargo, este modelo presenta como principal desventaja la dependencia generada desde el principio hacia la empresa prestadora del servicio, Telefónica Móviles SAU.

Este modelo de gestión del servicio, junto con un completo sistema de mantenimiento integral, proporcionado por la empresa adjudicataria para garantizar el cumplimiento de todos los requisitos y especificaciones técnicas, constituye la base de la calidad del servicio ofrecido a los usuarios finales.

Esta calidad se define a través de los siguientes parámetros: cobertura, nivel de servicio, capacidad, movilidad, fidelidad y robustez, conforme a las características propias de las redes PPDR.

Aparte de los problemas técnicos derivados del ciclo de vida natural de un sistema TIC, también surgieron dificultades de carácter externo relacionadas con la viabilidad empresarial del proveedor tecnológico de la red SIRDEE (AIRBUS D&S). Estos problemas, imposibles de ignorar en un servicio de esta envergadura, tienen una relevancia crucial, dado que el servicio es considerado estratégico para el Ministerio del Interior.

Todo lo expuesto anteriormente, ha llevado a la Secretaría de Estado de Seguridad a iniciar un estudio para evaluar cómo y en qué plazo se puede abordar la evolución del sistema actual SIRDEE. Este proceso debe ser diseñado de manera meticulosa, con una planificación detallada de las acciones necesarias para alcanzar los objetivos establecidos, basándose en dos premisas fundamentales:

- Reducir al máximo el impacto sobre los usuarios finales.
- Minimizar los riesgos tanto técnicos como operativos.

Esta evolución implica adoptar las tecnologías LTE y 5G como los nuevos estándares para las comunicaciones en entornos PPDR (también conocidas como comunicaciones críticas), conforme a diversos estudios realizados por la industria, operadores y usuarios finales. Estas tecnologías deben evolucionar hacia e-BB (*Broad Band for emergencies*) para poder gestionar funcionalidades de misión crítica.

La *release* 14 del 3GPP incorpora algunas funcionalidades de misión crítica, pero es con la versión 15 (*release* 15) cuando el e-BB se convierte en una realidad al menos sobre el papel. Pese a estar ya congeladas, la versión 14 debería haber estado implementada por los fabricantes del sector en 2019. Sin embargo, debido al limitado volumen de negocio que representa el ecosistema de las comunicaciones de emergencia en comparación con los usuarios convencionales, la investigación y desarrollo en el sector se ha centrado principalmente en estos últimos, dejando de lado a la comunidad PPDR. La situación es aún menos alentadora para la versión 15, ya que no existe una previsión temporal definida para su implementación por parte de los fabricantes.

Gracias al *knowhow* adquirido durante casi 25 años de operación del SIRDEE, el coste de desplegar una red LTE dedicada con funcionalidades PPDR y una cobertura equiparable a la ofrecida actualmente por el sistema resulta extremadamente elevado, hasta el punto de que no es posible establecer un presupuesto exacto. En este contexto, el uso de redes híbridas, que combinen la tecnología de radio actual (*trunking* digital) con redes LTE bajo diferentes modelos operativos, se perfila como la alternativa más viable, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- El traspaso entre la parte dedicada y la comercial (y viceversa) ha de realizarse de una manera ágil.
- En la red comercial, deben implementarse mecanismos que garanticen la diferenciación y la calidad de servicio para el tráfico asociado a las comunicaciones de emergencia (QPP).

Aunque se está intentando avanzar en los pasos regulatorios y normativos necesarios, actualmente en España no existe un marco legal que regule el *roaming* entre operadores ni que establezca la obligatoriedad de implementar mecanismos de priorización para los usuarios PPDR frente al resto de usuarios de un operador. Por tanto, mientras no se logren estos objetivos, en la parte de red comercial de un posible modelo híbrido se podrían generar limitaciones en las capacidades de comunicación de las FCSE inasumibles en un escenario de emergencia real (por ejemplo los vividos recientemente en la DANA de Valencia).

Plantear la evolución del sistema actual hacia una red con capacidades de banda ancha implica afrontar la complejidad de evaluar las necesidades de transmisión de datos y, en consecuencia, el espectro requerido. La comunidad científica considera que se requiere un mínimo de 10+10 MHz para cumplir con estas demandas. Sin embargo, en España estamos aún muy lejos de alcanzar esa cifra, ya

que únicamente se dispone de 5+5 MHz, y 3+3 MHz en forma desagregada, otorgados mediante una concesión de uso realizada por el Ministerio de Transformación Digital y Función Pública a la Secretaría de Estado de Seguridad para el despliegue de redes PPDR a nivel nacional.

La limitación en la cantidad de espectro radioeléctrico reservado para comunicaciones PPDR de banda ancha puede mitigarse mediante el uso de técnicas de multidifusión, como eMBMS. En el caso de España, cualquier solución viable requiere la implementación de estas técnicas, que, aunque están respaldadas por estándares claramente definidos, se consideran desarrollos *ad-hoc*, lo que inevitablemente incrementa los costes. Actualmente, solo un oligopolio de fabricantes tiene una implementación de estas técnicas disponible en su portafolio de productos para PPDR.

La Secretaría de Estado de Seguridad ha implementado dos redes piloto en las provincias de Albacete y Alicante, donde la Oficina del Programa SIRDEE, ha llevado a cabo (y continúa realizando) pruebas reales sobre el terreno. Estas pruebas han permitido al autor de este TFM participar activamente y extraer la mayoría de las conclusiones reflejadas en este documento. Entre las más destacadas se encuentran la imposibilidad actual de utilizar la banda B31 para servicios PPDR debido a las interferencias con el servicio de TDT, así como la complejidad y relevancia de optimizar la transmisión mediante eMBMS.

Tomando como referencia la lista de objetivos planteados en el capítulo 1, se procede a evaluar el nivel de cumplimiento alcanzado para cada uno de ellos:

Objetivo perseguido	Consecución
Justificación de la investigación realizada	Completo
Contextualizar el sistema actual de comunicaciones tácticas y operativas de las FCSE	Completo
Descripción de las principales características de la tecnologías LTE y 5G	Completo
Identificación de los retos existentes en un potencial proceso de migración	Completo
Confeccionar un documento de referencia de cara al próximo PPT SIRDEE.	Completo
Realizar pruebas de campo y simulaciones	Completo
Evaluación y verificación de la hipótesis principal planteada	Parcial

Tabla 5-1 Resumen del grado de consecución de los objetivos perseguidos.

A la luz de todo lo expuesto, se puede concluir que la hipótesis planteada al inicio de este Trabajo Fin de Máster no se confirma de manera completamente satisfactoria.

Tanto LTE como 5G, en sus versiones adaptadas para emergencias (e-BB), no han alcanzado aún el nivel de madurez tecnológica necesario para soportar un sistema de comunicaciones táctico-operativas policiales a nivel nacional, atendiendo a las particularidades y necesidades específicas del contexto español que hace que la utilización de 5G no sea una alternativa viable.

Sin embargo, tanto la Policía Nacional como la Guardia Civil no pueden mantenerse inactivas mientras se solucionan las deficiencias señaladas. Por el contrario, deben impulsar el desarrollo de aplicaciones móviles de *business critical* (como el caso del proyecto SIGO en movilidad) utilizando redes comerciales adecuadamente securizadas.

A medio plazo (2025-2030), la opción más viable consiste en mantener el sistema tradicional de banda estrecha, complementándolo con despliegues de redes LTE propietarias en las principales ciudades, mientras se resuelven las incertidumbres existentes. Asimismo, para no comprometer el progreso en la demarcación operativa de la Guardia Civil, se podrían llevar a cabo despliegues de redes LTE privadas en áreas rurales seleccionadas, en función del interés estratégico y la actividad policial de cada región.

Por todo lo desarrollado, en el momento actual, la transición que da nombre a este Trabajo Fin de Máster, es una quimera, pero es innegable e imparable que aparecen visos de realidad.

Las comunicaciones de misión crítica y su evolución han sido, son y seguirán siendo una prioridad para la Secretaría de Estado de Seguridad del Ministerio del Interior, manteniendo firme su objetivo de transformar el sistema actual que soporta las comunicaciones táctico/operativas policiales, avanzando hacia la incorporación de nuevas capacidades y servicios.

5.2 Líneas Futuras

Parece apropiado empezar el último apartado de este trabajo con la siguiente frase milenaria: “Un viaje de mil leguas comienza con un solo paso³⁴”. La evolución de una red de misión crítica de ámbito nacional hacia capacidades y servicios de banda ancha es un proyecto de gran magnitud. En el camino hacia su consecución se abren multitud de alternativas que pueden desencadenar en líneas alternativas de investigación.

Si en el corto o medio plazo se producen los cambios legislativos pertinentes que permitieran implementar mecanismos de QPP sobre las redes comerciales que operan en España, podría plantearse el estudio de evolución de la red SIRDEE sustentado únicamente sobre redes comerciales. Esta es la estrategia seguida en países de nuestro entorno como Francia o Finlandia.

La comunidad internacional en el ámbito de las comunicaciones PPDR, estima que en las próximas *World Radio Conferences* del año 2030 se anunciará la fecha del fin de las emisiones del servicio de la TDT. Cuando se materialice tal decisión, cesarán los problemas de interferencias en la banda B31 presentados en este trabajo. En esta situación se podría replantear la investigación teniendo en cuenta los 5+5 MHz a disposición del Ministerio del Interior y que permitiría:

- Poder estudiar, evaluar y probar la tecnología 5G, (esto también podría conseguirse si se evoluciona 5G para utilizar anchos de banda inferiores a 5 MHz).
- Hacer una comparativa al hacer uso frecuencias ubicadas en la parte baja de la banda UHF (entorno a los 450 MHz).

Otro análisis interesante sería redefinir el universo de estudio para pasar a una red de misión crítica de ámbito autonómico o local. En este caso el Ministerio de Transformación Digital y Función pública puede conceder 5+5 MHz en banda B68. Comparar el comportamiento en estas frecuencias, estudiar el ecosistema de equipamiento para determinar la viabilidad de una evolución son trabajos pendientes.

Sin duda, cuando las *Non Terrestrial Networks* sean una realidad, estudiar cómo será su adecuación a las redes PPDR supondrá un cambio de paradigma en las arquitecturas y estrategias de despliegue; aparentemente son una alternativa muy a tener en cuenta en redes de respaldo y en despliegues sin depender tanto de infraestructuras terrenas.

³⁴ Esta afirmación se atribuye al filósofo oriental Lao Tse allá por el siglo V a.c., el controvertido personaje que ha dado cuerpo al taoísmo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] COELHO DE SOUZA, P. (1988). *El alquimista*. Editorial Planeta, traducido por Monserrat Sierra, 2012, Barcelona.
- [2] COMISIÓN NACIONAL DE LOS MERCADOS Y LA COMPETENCIA, CNMC. (2019). *Panel de Hogares de la CNMC sobre usos de Internet, Audiovisual y Servicios de OTT*. Realizado por la CNMC en el Segundo trimestre 2019. Madrid.
- [3] CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, CUE. (2015). *Estrategia de Seguridad Interior de la Unión Europea renovada 2015-2020*. Bruselas.
- [4] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, BOE. (2019). *Orden PCI/161/2019, de 21 de febrero, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Seguridad Nacional, por el que se aprueba la Estrategia Nacional contra el Crimen Organizado y la Delincuencia Grave*. Publicado en el BOE núm. 46 de 22 de febrero de 2019. Madrid.
- [5] UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, UIT (2017). *Report ITU-R M.2377-1. Radiocommunication Objectives and Requirements for Public Protection and Disaster Relief*. 2017. Ginebra, Suiza 2017
- [6] COBOS ARCOS, M. (2021). *Gestión de Proyectos. Gestión de Crisis*. Academia de Oficiales de la Guardia Civil, apuntes de la asignatura Dirección de Organismos y Unidades del III Curso de Capacitación para el Ascenso a Comandante de la Escala de Oficiales de la Guardia Civil, enero 2021, Aranjuez Madrid.
- [7] MUÑOZ ABELLA, M^a. B. (2014). *Mantenimiento Industrial y de Sistemas*. Área de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III. Madrid.
- [8] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, NIST (2005). *Federal building and fire safety investigation of the World Trade Center disaster. The Emergency Response Operations*. Estados Unidos 2005.
- [9] TELEFÓNICA MÓVILES DE ESPAÑA SAU, TME (2013). *Curso Global del Servicio SIRDEE para Técnicos de las FCSE*. Dirección de Seguridad y Defensa, Proyecto SPICA. Julián Camarillo 8, Madrid. Abril de 2013.
- [10] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION, FCC (2010). *The Public Safety Nationwide Interoperable Broadband Network: a new model for capacity, performance and cost*. Washington D. C., Estados Unidos 2010.

- [11] HERNÁNDEZ RÁBANOS, J. M^a. (2006). *Transmisión por Radio*. Editorial Universitaria Ramón Areces. Quinta edición mayo 2006. Madrid.
- [12] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE EMPRESAS TECNOLÓGICAS DE DEFENSA, SEGURIDAD, AERONÁUTICA Y ESPACIO, TEDAE (2016). *Conferencia para el Estado Mayor de la Defensa: La Evolución de las Redes de Comunicaciones Tácticas de Defensa*. General Dynamics, Madrid 2016.
- [13] TACTICAL-CRITICAL COMMUNICATIONS ASSOCIATION, TCCA (2013). *Mission Critical Mobile Broadband: Practical Standardization & Roadmap Considerations*. Dirección de Seguridad y Defensa, Proyecto SPICA. Critical Communications Broadband Group. Febrero 2013.
- [14] DEL RÍO CARRIÓN, D. (2019). *Evolución de la Red de Radiocomunicaciones Digitales de Emergencias de la Región de Murcia (Red RADIECARM)*. Tesis Doctoral en Tecnologías de la Información y Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena. Campus de Excelencia. Cartagena.
- [15] STALLING, W. (2001). *Comunicaciones y Redes de Computadoras*. Editorial Prentice Hall, año 2001.
- [16] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE (2009). *Informe sobre la Evolución Tecnológica de la Red SIRDEE*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Julio de 2009.
- [17] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE (2015). *Pliego de Prescripciones Técnicas para la Contratación del Servicio SIRDEE para las anualidades 2016-2019 (exp. P-15-011)*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Mayo de 2015.
- [18] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE (2013). *Informe sobre la Estimación Económica del Servicio SIRDEE y su Comparación con Otras Redes Europeas*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Julio de 2013.
- [19] XUEYAN, X. (2018). *Estudio de Plataformas SDR para LTE-5G*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Cantabria, Santander.
- [20] COMISIÓN NACIONAL DE LOS MERCADOS Y LA COMPETENCIA, CNMC. (2024). *Informe de Seguimiento de la Tecnología 5G*. Realizado por la CNMC abril de 2024. Madrid
- [21] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE (2017). *Informe sobre la Nota Remitida por la Subdirección General de Planificación y Gestión del Espectro Radioeléctrico acerca de la Disponibilidad Futura de Espectro para Servicios PPDR particularizado para la Red SIRDEE del Ministerio de Interior*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Abril de 2017.
- [22] EUROPEAN TELECOMMUNICATION STANDARD INSTITUTE, ETSI. (2014). *Developing the Critical Communications. Standards for today and tomorrow*. Conferencia anual ETSI. París 2014
- [23] «WEB DEL THIRD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT, (3GPP) » [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases>. [Último acceso: 23 de octubre de 2024]
- [24] SALLENT, O. (2015). *Alternativas de Despliegue y Asignación de Espectro para las Redes Radio de Banda Ancha*. Monográfico Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Cataluña Julio de 2015.
- [25] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE (2019). *LTE-based Public Safety Networks: A Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials. Enero de 2019.

- [26] FRÍAS BARROSO, Z. (2014). *Análisis Tecno-Económico de REDES LTE*. Curso sobre LTE. Cátedra ISDEFE-UPM. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Madrid abril de 2014.
- [27] «WEB DE LA UNIÓN EUROPEA, (EU) » *Glosario de Términos* [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/glossary/open-internet-and-net-neutrality.html>. [Último acceso: octubre de 2024]
- [28] «WEB DE LA REPÚBLICA DE FRANCIA, (FREP) » *Legifrance, Le service public de la diffusion du droit*. [En línea]. <https://www.legifrance.gouv.fr/dossierlegislatif/JORFDOLE000046266613/>. [Último acceso: octubre de 2024]
- [29] «WEB DEL SERVICIO PÚBLICO FEDERAL DE BÉLGICA, (EJUSTICE) » *Arrêté royal concernant l'accès radioélectrique dans la bande de fréquences 700 MHz*. [En línea]. Available: https://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/article_body.pl?language=fr&caller=summary&pub_date=21-12-23&numac=2021022605. [Último acceso: octubre de 2024]
- [30] «WEB DEL CONGRESO DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA, (USGOV) » *PUBLIC LAW 112–96—FEB. 22, 2012 To provide incentives for the creation of jobs, and for other purposes*. [En línea]. Available: <https://www.congress.gov/112/plaws/publ96/PLAW-112publ96.pdf>. [Último acceso: octubre de 2024]
- [31] «WEB DEL FIRST RESPONDER NETWORK AUTHORITY, (FIRSTNET) » *FirstNet Partners with AT&T to Build Wireless Broadband Network for America's First Responders*. [En línea]. Available: <https://2014-2018.firstnet.gov/news/firstnet-partners-att-build-wireless-broadband-network-americas-first-responders>. [Último acceso: octubre de 2024]
- [32] CONFERENCIA EUROPEA DE ADMINISTRACIONES DE CORREOS Y TELECOMUNICACIONES, CEPT. (2013). *User Requirements and Spectrum needs for future European Broadband PPDR Systems*. ECC Report 199. Mayo 2013.
- [33] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE (2016). *Informe sobre Necesidades de Frecuencias en Relación a la Evolución de las Redes PPDR en el Ministerio del Interior*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Agosto de 2016.
- [34] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, BOE. (2015). *Orden IET/614/2015 por la que se modifica las notas UN del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias del año 2013*. Publicado en el BOE núm. 86 de 10 de abril de 2015. Madrid.
- [35] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, BOE. (2020). *Orden ETD/666/2020 de 13 de julio por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*. Publicado en el BOE núm. 198 de 21 de julio de 2020. Madrid.
- [36] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, BOE. (2021). *Orden ETD/1449/2021 de 16 de diciembre por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*. Publicado en el BOE núm. 308 de 24 de diciembre de 2021. Madrid.
- [37] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE (2021). *Pliego de Prescripciones Técnicas para la Contratación del Servicio SIRDEE para las anualidades 2022-2024 (exp. P-20-071)*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Enero de 2021.
- [38] COMES, A. (2010). *LTE: Nuevas tendencias en Comunicaciones Móviles*. Fundación Vodafone. Madrid, 2010.
- [39] THIRD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT, 3GPP (2014). *Delivering Public Safety*

Communications with LTE. Francia 2014.

- [40] QUITANA, J. (2018). *Servicio Basado en Tecnología LTE-Embms para Distribución de Señales de TV dentro de un Estadio de Fútbol*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior, Grado en Ingeniería, Tecnologías y Servicios de Telecomunicación. Universidad Autónoma de Madrid.
- [41] CRITICAL COMMUNICATIONS BROADBAND GROUP, CCBG (2013). *The Mission Critical Mobile Broadband: Practical Standardization & Roadmap Consideration*. Bruselas, febrero 2013.
- [42] DÍAZ, A., MORENO, M., JIMÉNEZ, J (2023). *Demonstration of slicing for PPDR communications*. ITIS Software. Universidad de Málaga.
- [43] TINGFANG, J. (2022). *How will sidelink bring a new level of 5G versatility? And how does it expand the connected intelligent edge*. Available: www.qualcomm.com. [Último acceso: octubre de 2024].
- [44] GROUPE SPECIALE MOBILE ASSOCIATION, GSMA (2019). *Espectro 5G: Posición de Política Pública de la GSMA*. Oficina Central de la GSMA. Londres, Reino Unido. Julio 2019. Available: www.gsma.com. [Último acceso: octubre de 2024].
- [45] MINISTERIO DE INDUSTRIA ENERGÍA Y TURISMO, (2021). *Análisis de la Coexistencia entre los Servicios de TDT, 5G y PPDR en la Banda 450 y 700 MHz*. Informe sobre los resultados obtenidos e las pruebas piloto realizadas en los municipios de Alcázar de San Juan y La Solana. Ministeriode de Industria, Energía y Turismo. Madrid octubre 2021.
- [46] BEN-ALLAL, E. (2020). *Monitorización y Parametrización de nodos LTE en Eventos de Alta Densidad de Usuarios*. Proyecto Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Grado en Ingeniería, Electrónica de Comunicaciones. Madrid.
- [47] VILLEBRUN, E. (2018). *Towards a Broadband Future*. Ponencia en el grupo de trabajo *Radio Expert Communication Group* (RECG). Helsinki 11 de abril de 2018.
- [48] GLOBAL PUBLIC SAFETY OPERATORS CONFERENCE, GPSOC (2024). *Plenary Sessions 3&4Q 2024 meeting*. Oficina Central de la GSMA. Washington D.C., Estados Unidos. Octubre 2024.
- [49] SAFENET FORUM SOUTH KOREA, SFSK (2024). *Global Harmonization with Public Safety Broadband Utilization 5G*. 2024 Public Safety Summit. Incheon, Corea del Sur. Octubre 2024.
- [50] CENTRO TECNOLÓGICO DE SEGURIDAD, CETSE (2021). *Informes de Estado de Progreso del Proyecto BroadEU.net*. Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad, Departamento de I+D+i. El Pardo, Madrid.
- [51] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE (2020). *Petición de Información a la Industria para la Evolución de la Red SIRDEE*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Marzo de 2020.
- [52] BELDA, E., BERNABEU, E., (2023). *Análisis del Método de Evaluación Multicriterio para el Despliegue e Implantación del Futuro Sistema de Radicomunicaciones de Emergencias del Estado*. Lógos; Revista Científica del Centro Universitario de la Guardia Civil. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, junio de 2023.
- [53] «WEB DE EURONEWS, (EURONEWS) » *Nokia anuncia un despido masivo de 14 000 trabajadores tras la caída del negocio*. [En línea]. Available: <https://es.euronews.com/2023/10/19/nokia-anuncia-un-despido-masivo-de-14-000-trabajadores>. [Último acceso: noviembre de 2024].
- [54] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE (2024). *Pruebas de Optimización del Piloto LTE en la provincia de Albacete*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Octubre de 2024.

- [55] APLICACIONES Y PROYECTOS TIC, S.L., APTICA (2023). *Curso sobre Redes Móviles LTE para la Oficina del Programa SIRDEE*. Ministerio de Interior, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid. Mayo 2023
- [56] DE LA FUENTE, A., PÉREZ, R., GARCÍA, A. (2013). *Análisis de Prestaciones de eMBMS en LTE: Redes de Frecuencia Única*. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Carlos III. Madrid 2013.
- [57] GÓMEZ, C. (2021). *Redes Móviles 5G: Evolución New Radio*. Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Telecomunicación. Universidad Obrera de Cataluña.
- [58] OFICINA DEL PROGRAMA SIRDEE, OPSIRDEE-bis (2024). *Pruebas de Banda Ancha de las Organizaciones Usuarías en las provincias de Albacete y Alicante*. Ministerio de Interior, Secretaría de Estado de Seguridad, Subdirección General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad. El Pardo, Madrid. Marzo de 2024.
- [59] DIRECCIÓN GENERAL DE LA GUARDIA CIVIL, DGGC (2024). *Informe Sobre las Pruebas de Usuario en las Provincias de Albacete y Alicante*. Servicio de Telecomunicaciones de la Guardia Civil, Jefatura de Servicios Técnicos, Mando de Apoyo de la Guardia Civil. Madrid 2024.
- [60] DIRECCIÓN GENERAL DE LA POLICÍA NACIONAL, DGPN (2024). *Informe Sobre las Pruebas de Usuario en las Provincias de Albacete y Alicante*. Área de Telecomunicaciones, Subdirección General de Logística e Innovación. Madrid 2024.

ANEXO I: ACRÓNIMOS

Acrónimo	Descripción
APCO.	<i>Association of Public-Safety Communications Officials-International.</i>
BB.	<i>Broad Band.</i>
BOE.	Boletín Oficial del Estado.
CEPT.	Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones.
CETSE.	Centro Tecnológico de Seguridad.
CNAF.	Cuadro Nacional de Atribuciones de Frecuencia.
COC.	Centro Operativo Complejo.
COS.	Centro Operativo de Servicios.
CTA.	Centro Técnico Administrativo.
DGGC.	Dirección General de la Guardia Civil.
ECC.	<i>Electronic Communications Committee.</i>
eMBMS.	<i>Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service.</i>
ESTI.	<i>European Telecommunication Standard Institute.</i>
ETSIT.	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación.
EUCCS.	<i>European Critical Communication System.</i>
FDMA.	<i>Frequency Division Multiple Access.</i>
FFCCSS.	Fuerzas y Cuerpos de Seguridad.
FCSE.	Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado.
GBR.	<i>Guaranteed Bit Rate.</i>
GC.	Guardia Civil.
GCSE	<i>Group Communications System Enablers</i>
GPSOC.	<i>Global Public Safety Operators Conference.</i>
HP.	Hipótesis Principal
I+D+i	Investigación Desarrollo e Innovación.
IOPS	<i>Isolated Operations</i>
Kbps.	Kilobits por Segundo.
LEO	<i>Low Earth Orbit.</i>
LTE.	<i>Long Term Evolution.</i>
MBSFN	<i>Multicast Broadcast Single Frequency Network</i>
MCPTD.	<i>Mission Critical Push To Data.</i>

MCPTT.	<i>Mission Critical Push To Talk.</i>
MCPTV.	<i>Mission Critical Push To Video.</i>
MCS.	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MHz.	Megahercio.
MIR.	Ministerio del Interior.
NIST.	<i>National Institute of Standards and Technology.</i>
NTN.	<i>None Terrestrial Networks.</i>
ONU.	Organización de las Naciones Unidas.
PCSTORM.	<i>Plateforme Commune des Services de Télécommunications Opérationnelles et de Réseaux Mobiles</i>
PMR.	<i>Private Mobile Radio.</i>
PN.	Policía Nacional.
PPDR.	<i>Public Protection and Disaster Relief.</i>
PSRG.	<i>Public Safety Radio Group.</i>
QoS.	<i>Quality of Service.</i>
QPP.	<i>Quality of Service, Priority and Pre-emption.</i>
RCEG.	<i>Radiocommunication Expert Group.</i>
RD.	Real Decreto.
RFI.	<i>Request For Information.</i>
RRF.	<i>Réseau Radio du Futur.</i>
RSRP.	<i>Reference Signal Received Power</i>
RSRQ	<i>Reference Signal Received Quality</i>
SEPI.	Sociedad Estatal de Participaciones Industriales.
SES.	Secretaría de Estado de Seguridad.
SFN	<i>Single Frequency Network</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SIRDEE.	Servicio Integral de Radiocomunicaciones de Emergencia del Estado.
TCCA.	<i>Tactical Critical Communication Association.</i>
TDMA.	<i>Time Division Multiple Access.</i>
TETRA.	<i>Terrestrial Trunked Radio.</i>
TFM.	Trabajo Fin de Máster.
TIA.	<i>Telecommunications Industry Association.</i>
TIC.	Tecnologías de la Información y Comunicaciones.
UE.	<i>User Equipment.</i>

UHF. *Ultra High Frequency*

UL. *Up Link.*

ANEXO II: APLICACIÓN DE METODOLOGÍA SUBJETIVA: LA ENCUESTA³⁵



Figura A2-1 Vista general de la encuesta.

1.- ¿En términos generales, ¿Está satisfecho con las transmisiones SIRDEE en el ejercicio de sus comunicaciones profesionales?

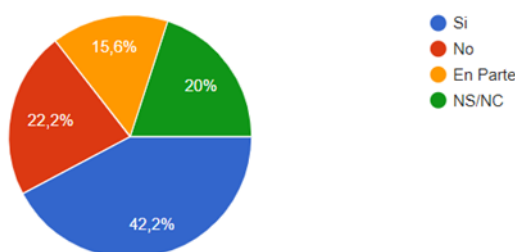


Figura A2-2 Estadísticas cuestión 1.

2.- ¿Tiene déficit de cobertura SIRDEE en alguna zona de INTERÉS POLICIAL en su demarcación?



Figura A2-3 Estadísticas cuestión 2.

³⁵ Se han recogido un total de XX respuestas a través del recurso web de elaboración propia disponible en <https://forms.gle/Sq6wm3jXicnuBPKZ8>

3.- ¿Conoce el procedimiento para consultar personas o matrículas a través de los equipos radio SIRDEE?

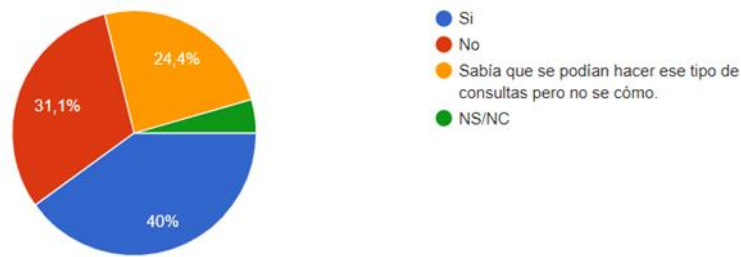


Figura A2-4 Estadísticas cuestión 3.

4.- ¿Sabe qué es el modo directo en transmisiones y como activarlo en los equipos SIRDEE?

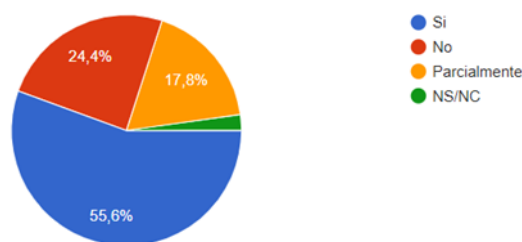


Figura A2-5 Estadísticas cuestión 4.

5.- En caso de tener que gestionar un incidente grave, ¿le resultaría útil y le aportaría valor poder transmitir imágenes en tiempo real?

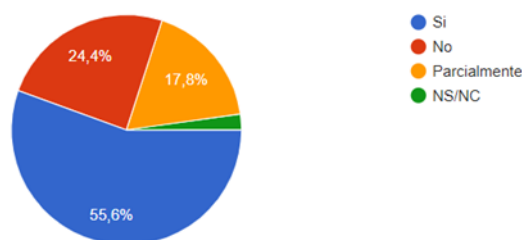


Figura A2-6 Estadísticas cuestión 5.

6.- ¿Aportaría valor a sus comunicaciones policiales videollamadas de grupo en lugar de comunicaciones puramente de voz?

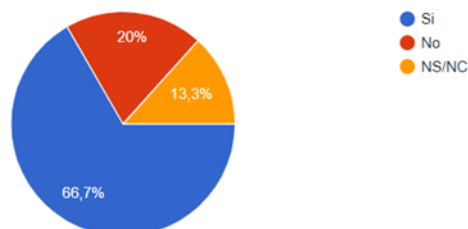


Figura A2-7 Estadísticas cuestión 6.

7.- ¿cree necesario disponer de un mensaje de mensajería multimedia instantáneo incorporado a los equipos de radiotransmisiones?

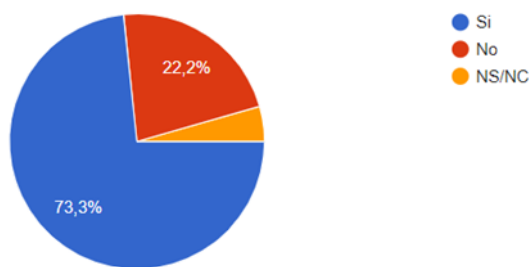


Figura A2-8 Estadísticas cuestión 7.

8.- ¿Le inspiraría confianza un sistema de transmisiones policiales basado en redes públicas comerciales (tipos Movistar, Vodafone, etc.)?

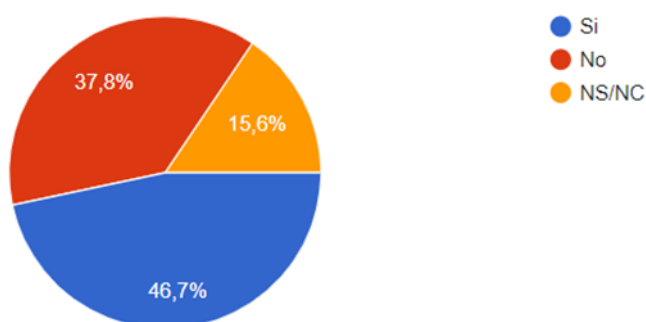


Figura A2-9 Estadísticas cuestión 8.

ANEXO III: EJEMPLO DE UNA RFI

PROGRAMA SIRDEE

Petición de Información a la Industria - Vodafone

1. OBJETO DEL DOCUMENTO

Este documento tiene como objeto realizar una consulta a la industria especializada en comunicaciones de misión crítica. La información obtenida será analizada en detalle y las conclusiones extraídas servirán de base para la definición de la futura red SIRDEE.

2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

[REF-01] N/A

3. INTRODUCCIÓN

El Sistema Integral de Radiocomunicaciones Digitales de Emergencias del Estado (SIRDEE) fue creado en el año 2000 con la finalidad dotar a las Fuerzas y Cuerpo de Seguridad del Estado (FFCCSE) de un servicio de radiocomunicaciones fiables, seguras y con una alta disponibilidad.

De acuerdo a estos criterios, se optó por una tecnología trunking (TETRAPOL) y un modelo de servicio integral que incluye, además del propio servicio, el mantenimiento de todo el material asociado a la red, formación al usuario, asistencia técnica, así como herramientas software de gestión de comunicaciones y emergencias para todas las salas de atención al ciudadano de Policía Nacional y Guardia Civil.

Con el paso de los años, SIRDEE ha demostrado ser un caso de éxito, justificando su presupuesto y dejando en evidencia a otras redes que no están preparadas para su funcionamiento en situaciones de catástrofe. De ahí que sea necesario recordar que el concepto de misión crítica no es disponer de una red con determinada funcionalidad, como: PTT (Push-to-Talk), comunicaciones de grupo, etc., sino la incorporación de los tres factores básicos indicados en el primer párrafo: fiabilidad, seguridad y alta disponibilidad.

Actualmente, la red SIRDEE está desplegada por todo el territorio nacional contando con una cobertura superior al 95% de la geografía y una disponibilidad superior al 99,8%, con un servicio de atención al usuario y supervisión de Sistema 24x7, cifrado extremo a extremo, seguridad física de los emplazamientos, sistemas redundantes y de protección de energía, etc., que garantizan que sus prestaciones puedan recibir la denominación de misión crítica.

Con el paso del tiempo y la implantación de las redes comerciales de comunicaciones móviles de banda ancha, las necesidades los usuarios de la red ha evolucionado hacia la demanda de otro tipo de servicios como, además de la voz, la posibilidad del intercambio de información que requiere un ancho de banda mayor que el disponible en las redes trunking.

Por ello, el Programa SIRDEE, en el actual contrato, ya contempló experiencias piloto de banda ancha mediante la tecnología LTE al objeto de conocer el estado del arte de la tecnología en su aplicación a las redes de misión crítica, siempre basado en estándares 3GPP.

Este documento de petición de información tiene como finalidad conocer la capacidad de la industria para proveer una solución tecnológica capaz de dotar a las FFCCSE de un servicio de

radiocomunicaciones de banda ancha de misión crítica. Las conclusiones del análisis de toda la información recabada servirán de base para definir el futuro de la red SIRDEE.

En los siguientes apartados se realiza una descripción del proceso de petición de información, así como un cuestionario que deberá ser respondido por todas aquellas empresas que hayan sido invitadas a esta convocatoria y deseen formar parte del futuro de la red SIRDEE.

4. PREPARACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN

A continuación se dan unas directrices para la preparación de la documentación:

- Deberán entregar su aportación antes del 30 de marzo de 2020.
- Se incluirá una breve introducción de cómo ven el panorama actual para las redes de misión crítica.
- Darán respuesta a cada una de las respuestas, salvo que no sea aplicable a su caso.
- Todas las respuestas estarán razonadas. En caso contrario no serán consideradas.
- Durante la fase de elaboración de las respuestas podrán dirigirse a la Oficina del Programa SIRDEE para resolver cualquier duda acerca de las preguntas recogidas en este documento. Las respuestas se harán públicas a todos los participantes, siendo anónimo el origen de la pregunta.

En la preparación de las respuestas se ha de tener en cuenta las circunstancias en las que actualmente se encuentran las redes PPDR de banda ancha en España.

- En la actualidad la única banda disponible asignada a la Secretaría de Estado de Seguridad para el despliegue de redes móviles de banda ancha es la B31 (450 MHz) con 5+5 MHz.
- Dada la escasez de espectro y la necesidad de las comunicaciones de grupo, se estima obligatorio el uso de técnicas de aprovechamiento espectral como MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services).
- Las soluciones deben cumplir los estándares 3GPP a partir de la Release 13, asegurando la interoperabilidad entre las capas de terminales, radio, core y servicios con independencia del fabricante, no aceptándose soluciones propietarias.
- Debe garantizarse la interoperabilidad entre la red privada y las comerciales LTE.
- Debe existir interoperabilidad entre la red LTE y TETRAPOL.
- Dado que se prevé una reserva espectral en la banda de 700 MHz con finalidades PPDR por parte del Ministerio de Industria, las soluciones deben ser compatibles tanto en la banda de 450 MHz como en 700 MHz.

5. CUESTIONARIO

5.1. MODELO DEL SERVICIO

El SIRDEE no es simplemente el servicio de una red de radiocomunicaciones destinado a las FFCCSE, se denomina Sistema Integral porque se trata de una prestación llave en mano adaptada a la operación específica de nuestras FFCCSE que, además de ese servicio, incluye: la operación y supervisión de la red; vigilancia de todos los emplazamientos donde existe equipamiento SIRDEE; mantenimiento del equipamiento, incluidos los terminales y sus accesorios; equipos de gestión de usuario; servicio atención al usuario; salas de mando y control, incluyendo mobiliario y su mantenimiento; formación; etc.

En la actualidad, SIRDEE cuenta con cerca de 70.000 terminales repartidos a los agentes que realizan actividad en la calle; pero también incluye las cerca de 5.000 instalaciones fijas de todos los puestos y comisarías de Guardia Civil y Policía Nacional repartidos por la geografía española.

A esto hay que añadirle el grado de cobertura superior al 95% del territorio nacional, una disponibilidad superior al 99,8% del tiempo, y una determinada capacidad de tráfico cursado que garantiza las comunicaciones de las FFCCSE en cualquier situación.

Quizás el mayor reto que se presenta en el futuro de la red SIRDEE sea la introducción, la transición y la completa migración, de la red actual, hacia la tecnología LTE. Y, probablemente, el mayor obstáculo, además de la disponibilidad de la propia tecnología orientada a las comunicaciones críticas, es respetar la integridad del servicio actual en el proceso de actualización. En ninguno de los escenarios que se plantee puede aceptarse la interrupción del servicio de comunicaciones de las FFCCSE.

De acuerdo a la definición de misión crítica recogida en el apartado de Introducción, ¿cómo abordaría el servicio de la red SIRDEE para seguir manteniendo sus prestaciones en la transición hacia una red de banda ancha?

¿Cómo podría adoptarse sin una interrupción del servicio y manteniendo el servicio de voz crítica actual?

Dentro del modelo actual del servicio descrito, ¿en qué parte/s considera que puede participar ofreciendo un servicio de misión crítica? ¿Qué papel cree que puede tener su empresa en el futuro del SIRDEE?

- Como proveedor único del servicio (operador)
- Proveedor del servicio de banda estrecha
- Proveedor del servicio de banda ancha
- Proveedor de infraestructura
- Proveedor de capa radio
- Proveedor de terminales
- Proveedor de capa de servicios
- Otros (indique)

¿Considera otro tipo de modelo de servicio que pueda ser más ventajoso que el actual para el Ministerio del Interior?

5.2. REQUISITOS TÉCNICOS

5.2.1. SOBRE USO DEL ESPECTRO

En la actualidad la única banda asignada para comunicaciones PPDR de banda ancha en España es la B31; aunque existen recomendaciones desde la Comisión Europea de reservar espectro en la banda de 700 MHz y, probablemente, la próxima edición del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) incluya las banda B28 y B68 para esta finalidad,

Considerando el estado actual del arte, así como las decisiones de otros países, ¿cuál sería la/s banda/s elegida/s para realizar un despliegue a nivel nacional en España?

Durante la fase piloto en 450 MHz se han detectado innumerables casos de interferencia con la banda B21 de TDT. Además, se prevé que esta situación se repita para la banda de 700 MHz, dada la ubicación espectral prevista y las bandas de TDT. Esto implica que para poder llevar a cabo el despliegue de la red LTE se requiera resolver este inconveniente.

¿Cuál debería ser la solución aplicada? En caso de que la Administración no pudiera hacer frente a esta situación de forma ágil para poder realizar el despliegue de red, ¿tendría su empresa capacidad de implementar la solución propuesta? En caso afirmativo, ¿bajo qué condiciones?

Actualmente los gestores de redes de misión crítica se dividen entre los que apuestan por soluciones Unicast y por soluciones Multicast (eMBMS). En España, la red SIRDEE está apostando por las soluciones MBMS dada la escasez espectral con la que cuenta. Además, la reserva en la banda de 700 MHz será, según se prevé, como máximo de 3+3 MHz o 5+5 MHz.

¿Cree conveniente el uso de soluciones Unicast en redes de misión crítica? En caso afirmativo, ¿en qué casos? ¿Cuál sería el número máximo de comunicaciones simultáneas permitidas para la disponibilidad espectral actual? Ponga varios ejemplos, considerando sólo voz y compartiendo con otros servicios (p.e. vídeo) indicando la calidad.

¿Tiene actualmente soluciones eMBMS para las bandas PPDR? En caso afirmativo, describa su solución. ¿En qué frecuencias están implementadas y dónde?

5.2.2. SERVICIOS

Dentro de los servicios básicos que se debe contemplar en la red de banda ancha están los siguientes:

- Comunicaciones individuales (voz, vídeo)
- Comunicaciones de grupo (voz, vídeo)
- Mensajería de texto, foto, vídeo. (individual y grupal)
- Llamadas de emergencia
- Geolocalización

¿Dispone de soluciones MCPTx compatibles con eMBMS dentro del estándar 3GPP?

¿En qué release del 3GPP se basa y qué apartados de la misma implementa su solución en relación a los aspectos de misión crítica?

La red SIRDEE de banda estrecha permite trabajar con varias organizaciones usuarias de manera independiente, lo que podría denominarse como multiorganización, y gestionar cada una de ellas sus grupos de trabajo de manera independiente del resto. Pero a la vez, se pueden crear grupos comunes para el establecimiento de comunicaciones entre organizaciones, lo que podría denominarse interorganización. Explique cómo su solución resolvería esta forma de jerarquizar la red.

5.2.3. SOBRE TERMINALES

Una parte importante en el uso de la red son los terminales, ya que, es el elemento que debe aportar al usuario de la funcionalidad para la que se crea la red. En el mercado se pueden encontrar multitud de terminales para la red comercial, pero no existen tantas variantes en el mundo de misión crítica.

En el futuro, cuando SIRDEE disponga de una red de banda ancha, los usuarios de la red necesitarán terminales que cumplan con sus requisitos operativos específicos de misión crítica.

¿Tiene capacidad de proveer terminales LTE para redes dedicadas de misión crítica? En caso afirmativo, ¿qué tipo de terminales: portátil, móvil, despacho, Smartphone, ruggedizado, etc.? Indique las prestaciones de los terminales que estén en su catálogo y que sean compatibles con la aplicación de misión crítica y las bandas de operación.

¿Dispone de terminales multibanda que permitan la operación tanto en redes dedicadas como en redes comerciales? Especifique las bandas de trabajo.

¿Los terminales que puede proveer disponen de Modo Directo? ¿Se trata de una solución abierta según estándares o es propietaria?

¿Ha sido probada la compatibilidad del Modo Directo con terminales de otros fabricantes? En caso afirmativo, indique cuáles.

¿Qué aplicaciones de misión crítica han sido probadas con éxito en sus terminales? ¿Qué tipo de adaptación han requerido para su funcionamiento? Por ejemplo, modificación de middleware.

¿Dispone de terminales compatibles con la definición eMBMS del estándar 3GPP?

Desde la Release 12 se plantea que para las redes de misión crítica se disponga de terminales de 23 dBm y de 31 dBm, principalmente con miras al D2D (modo directo). Con terminales de alta potencia no sólo se mejora el alcance en Modo Directo, sino que mejora el balance con el eNB aumentando su radio de cobertura. ¿Dispone de terminales de alta potencia (31dBm~1.25W)? En caso afirmativo, especifique.

5.2.4. SOBRE HERRAMIENTAS DE DESPACHO

Para llevar a cabo una adecuada gestión de las comunicaciones por parte del usuario es necesario que en cada sala de control se disponga de herramientas informáticas para tal fin. ¿Qué herramientas considera esenciales para la gestión de las comunicaciones? ¿Qué funcionalidad mínima deberían tener? Por ejemplo, administración de grupos.

Además de la gestión de las comunicaciones, desde las salas de control se atienden las llamadas de emergencia realizadas por los ciudadanos, por lo que es recomendable disponer de herramientas de gestión de incidencias / emergencias que asistan a los operadores de la sala. ¿Qué herramientas considera más apropiadas y qué funcionalidad mínima deberían tener? ¿Dispone de alguna herramienta que pudiera aportar como parte del servicio SIRDEE?

¿Dispone de alguna solución integrada de gestión de incidencias y comunicaciones? En caso afirmativo, describa su arquitectura y funcionalidad.

¿Considera de interés alguna aplicación adicional para el puesto de despacho?

¿Su solución de despacho podría coexistir con otras con total interoperabilidad en su supuesto de migración suave hacia la banda ancha?

Actualmente, las organizaciones usuarias de SIRDEE cuentan con sus propios MDM para la gestión de los dispositivos de propósito general que operan en las redes móviles comerciales. ¿Sería

posible integrar estos MDM con una red privada para la gestión simultánea de los terminales SIRDEE de LTE en ambos ámbitos?

5.2.5. GRABACIÓN DE LAS COMUNICACIONES

Las comunicaciones de los usuarios de red han de ser grabadas para mantener un registro de las mismas y ser empleadas en determinadas situaciones.

¿Puede suministrar una solución de grabación de las comunicaciones de red? ¿Emplearía una solución centralizada o distribuida? ¿Qué servicios se podrían registrar: voz, vídeo, etc.?

¿Su solución de grabación dispondría de alguna facilidad para la protección de las grabaciones en cuanto a integridad, acceso, etc.?

5.2.6. SEGURIDAD

Describa los mecanismos de seguridad que se implementan en los diferentes componentes de su solución para garantizar la disponibilidad de la red.

Describa el tipo de cifrado a implementar en las comunicaciones (información del usuario) y los diferentes interfaces de la red.

Describa los mecanismos de seguridad dispuestos en los terminales y sus aplicaciones: login, bloqueo remoto, etc.

5.2.7. INTEROPERABILIDAD CON OTRAS REDES

Durante la coexistencia de la red de banda estrecha y la futura red de banda ancha es necesario la interoperabilidad de ambas redes permitiendo las comunicaciones de voz y datos de baja velocidad de una red a otra, así como respetar la política de grupos de comunicación establecido en la red actual.

¿Tiene su empresa actualmente una solución para garantizar dicha interoperabilidad entre una red TETRAPOL y una red LTE? En caso afirmativo, indique el grado de interoperabilidad disponible.

Durante un tiempo indefinido, con total certeza, se va a requerir el uso en banda ancha tanto de la red privada como de redes comerciales. Ante esta situación, las soluciones aportadas por la industria deben permitir la interoperabilidad entre ambos entornos y el paso de una red a otra, por cuestiones de cobertura, con el mínimo tiempo de interrupción del servicio.

Indique las estrategias definidas en el terminal, o en otra parte de la red, para el tránsito de aquéllos entre redes diferentes para minimizar el tiempo necesario para retomar el servicio.

Teniendo en cuenta el panorama legislativo actual de España, ¿considera que las soluciones basadas en redes híbridas (dedicadas + comerciales) pueden categorizarse como de misión crítica?

5.3. GESTIÓN DEL PROYECTO

Considerando que no puede existir interrupción del servicio de radiocomunicaciones de las FFCCSE, se identifican dos opciones para llevar a cabo el proyecto: coexistencia de la red de banda estrecha mientras se despliega la banda ancha e iniciar el servicio con una red de banda ancha completamente operativa a partir de una fecha. ¿Estaría en condiciones de proveer el servicio de banda ancha sin interrupción del servicio actual? Explique su propuesta.

Suponiendo que en la actualidad tuviera la capacidad para proveer un servicio de red de banda ancha de misión crítica, ¿cuánto tiempo estima necesario para desplegar una red a nivel nacional con los niveles de calidad, cobertura y disponibilidad que la actual red de banda estrecha?

Bajo la hipótesis de una red con 70.000 usuarios, con terminales de diferente tipología, y considerando todas sus respuestas a los requisitos técnicos anteriores y los servicios que contempla la actual red SIRDEE (mantenimiento, formación, atención al usuario, salas de control, herramientas de despacho, etc.), indique el coste estimado total y por usuario (o dispositivo con acceso a la red) en base a diferentes escenarios.

En este documento se plantean diversas incertidumbres sobre el futuro de las redes de banda ancha para misión crítica. Si se quiere garantizar el éxito de este proyecto se requiere realizar un análisis de riesgos adecuado, así como plantear medidas de mitigación y planes de contingencia en caso de materialización de los riesgos.

¿Cuáles considera que son los principales riesgos del proyecto de despliegue de la red de banda ancha, sus consecuencias e impacto posible sobre el proyecto? ¿Cuáles serían las medidas de mitigación que aplicaría y qué planes de contingencia definiría?